



2022 大灣區科學論壇

GREATER BAY AREA SCIENCE FORUM

# 核技术应用：X/γ 射线医学诊断

——医学成像对核技术的期许

魏 龙

中国科学院高能物理研究所

2023/05/23

# CONTENTS 目录

- X/  $\gamma$  射线医学诊断设备
- X/  $\gamma$  射线医学影像设备发展趋势
- 高能物理核物理助力医学诊断

1

# ■ X/γ 射线医学诊断设备

## 医学诊断

- ⑩ DR
- ⑩ CT
- ⑩ PET
- ⑩ SPECT

## 肿瘤治疗

- ⑩ 同位素靶向治疗
- ⑩ 电子束治疗
- ⑩ 质子束治疗
- ⑩ 重子束治疗
- ⑩ 中子束治疗

## 同位素生产

- ⑩ 显像用核素
- ⑩ 治疗用核素

## ■ 核医学成像、诊断、治疗的现状



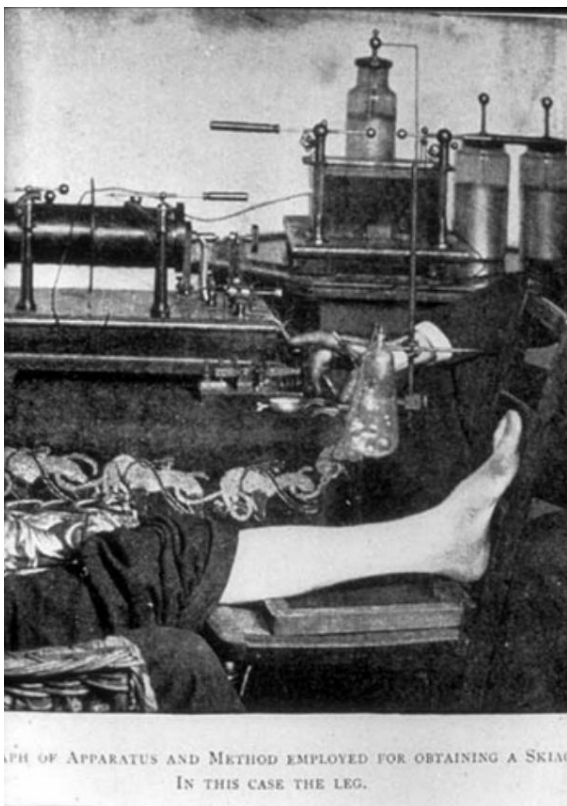
核医学设备~12000台



核医学设备~800台

- 利用射线 或 参与生物体新陈代谢的放射性核素标记药物来进行诊断和治疗。可在组织或器官发生结构性变化之前发现**早期病灶**
- 核医学手段所带来的**体外照射** 或 **体内放射性**及相对高昂费用，在新的颠覆性技术到来之前，依然是医生和患者无奈的选择

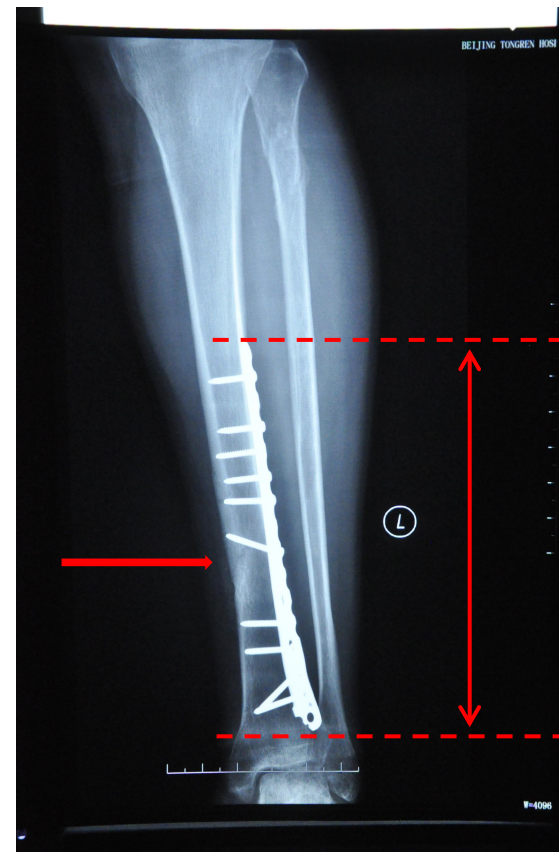
# X射线透视成像的医学应用



First photo of X-ray method to patient's leg, 1896年。



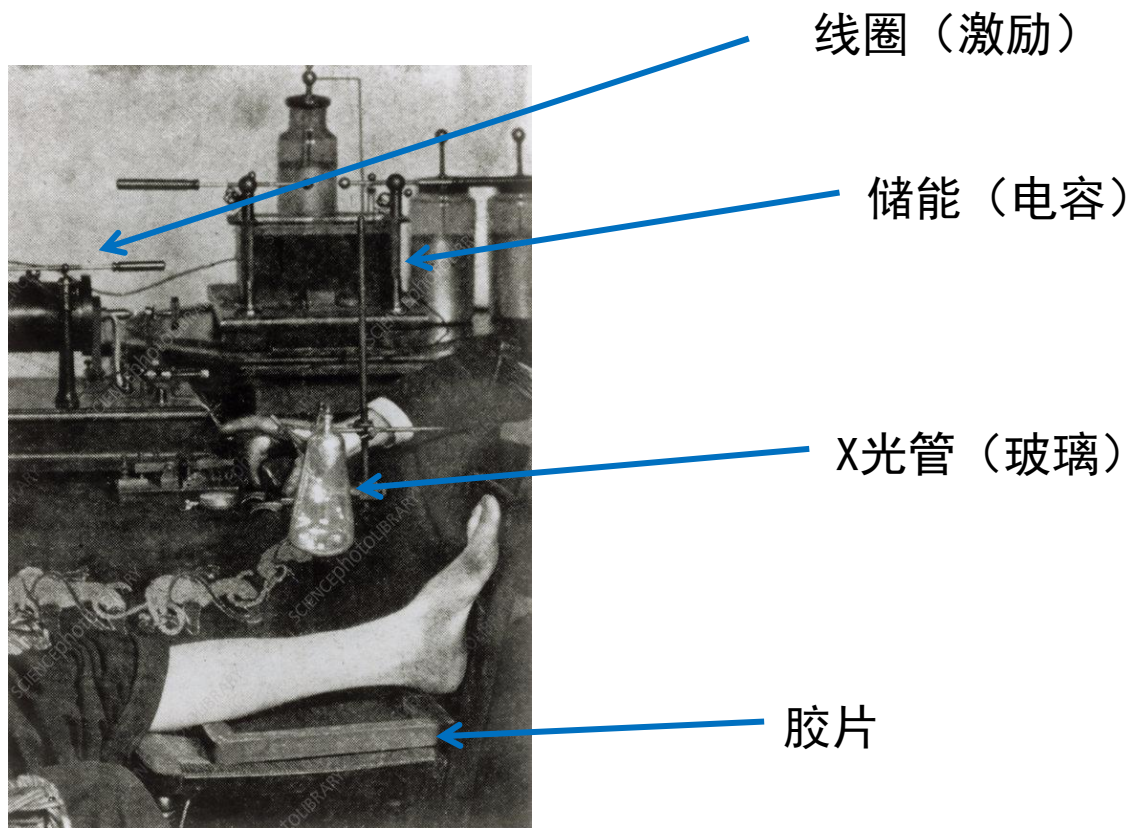
2015年：120年后……



照片揭示了什么？

进入21世纪，人们依然在利用这一技术在医学诊断中的价值

# X射线透视成像的医学应用



First photo of X-ray method to patient's leg, 1896年。



进入21世纪，人们依然在利用这一技术在医学诊断中的价值

## CT：计算机断层扫描仪（Computed Tomography）

伦琴发现X射线以来医学影像领域最伟大的发明



Allan M. Cormack



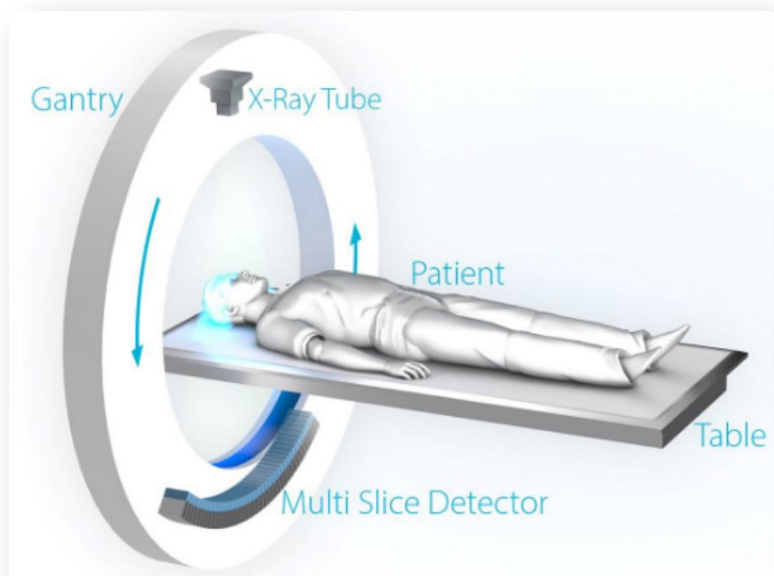
Godfrey N Hounsfield

The Nobel Prize in Physiology or  
Medicine 1979 was awarded jointly to  
Allan M. Cormack and Godfrey N  
Hounsfield

“for the development of computer  
assisted tomography.”

—— 诺贝尔奖颁奖词

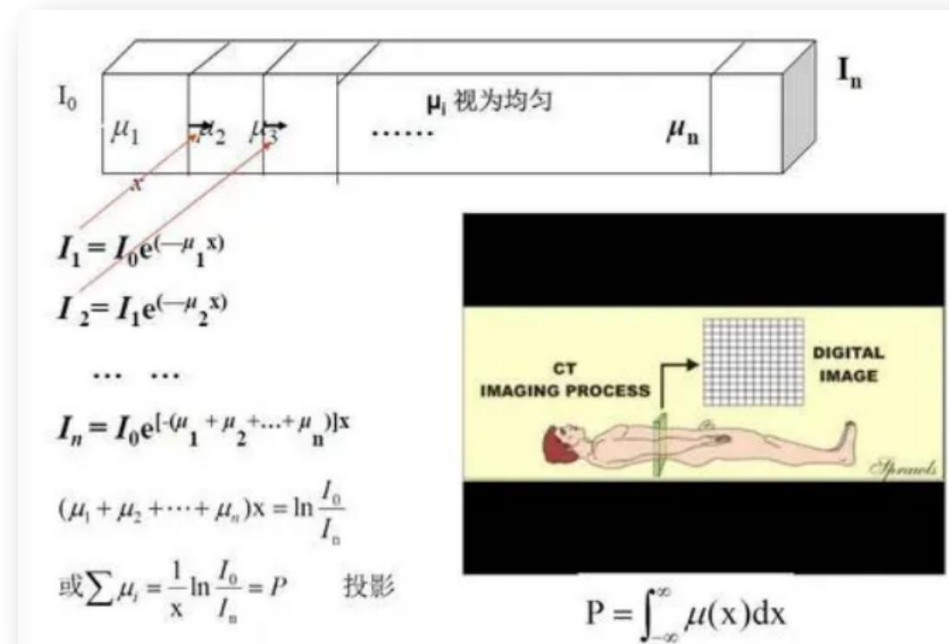




## CT工作过程及成像原理

成像过程：球管 → X线 → 准直器 → 窄的扇形束 → 穿透人体体层 → 人体薄层内器官或组织衰减后 → 到达探测器 → 将含有一定图像信息的X线光信号 → 电信号 → 放大 → A/D转换器 → 数字信号 → 计算机 → 运算 → 重建图像。

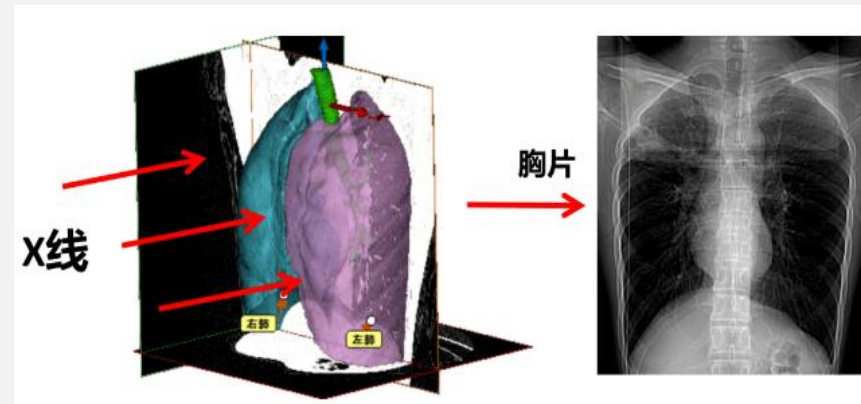
成像原理：CT每扫描一次，即可得到一个方程，经过若干次扫描，即得到一联立方程。经过运算（傅立叶转换、反投影法等）解出方程，从而求出人体对应的每个体素的X射线衰减系数，并转变为由黑到白的不同灰度，即像素（pixel），即构成了CT图像。





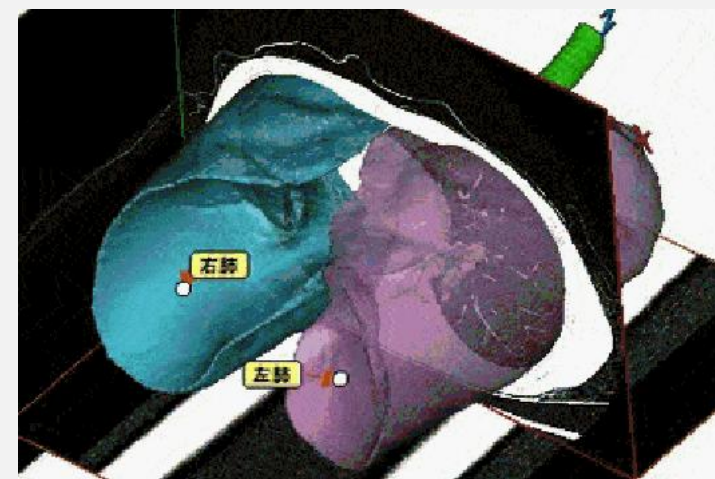
## X射线透视：DR、拍片

- 某一角度的二维图像。
- 同一方向的结构信息重叠，影响诊断。
- 信息单一，没有深度信息。
- **病变定位不准确，容易漏诊。**



## X射线CT：断层、切片

- 三维切片图像(矢状、横断、冠状)
- 无结构信息重叠，可定位。
- 信息丰富（三维结构和CT值变化）。
- **病变无遮挡，一览无余。**



宽体CT：探测器宽度达16cm，一次扫描可覆盖心脏、颅脑、肝脏等全器官成像。

根据《中国心血管健康与疾病报告2020》指出，我国心血管疾病患病率处于持续上升阶段，心血管疾病现患病人数高达3.3亿，**每5例死亡中就有2例死于心血管疾病。**

## 探测器



16排CT < 20 mm



64排CT < 40 mm

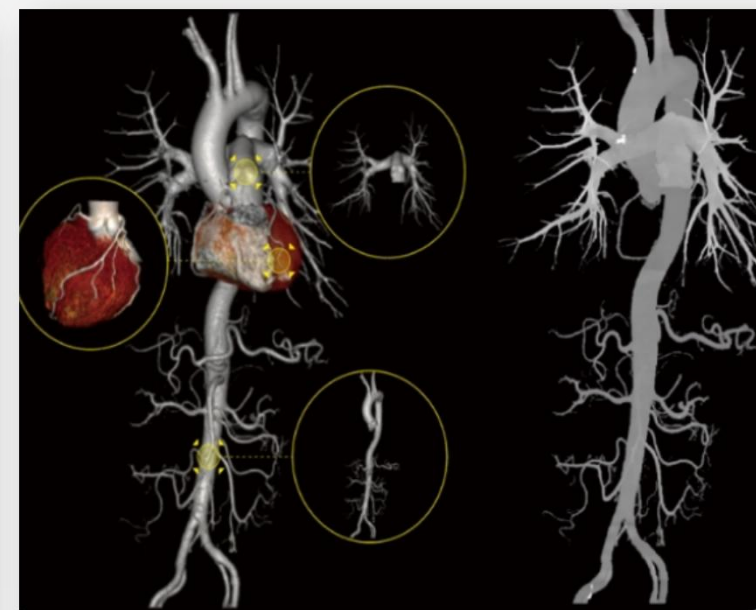
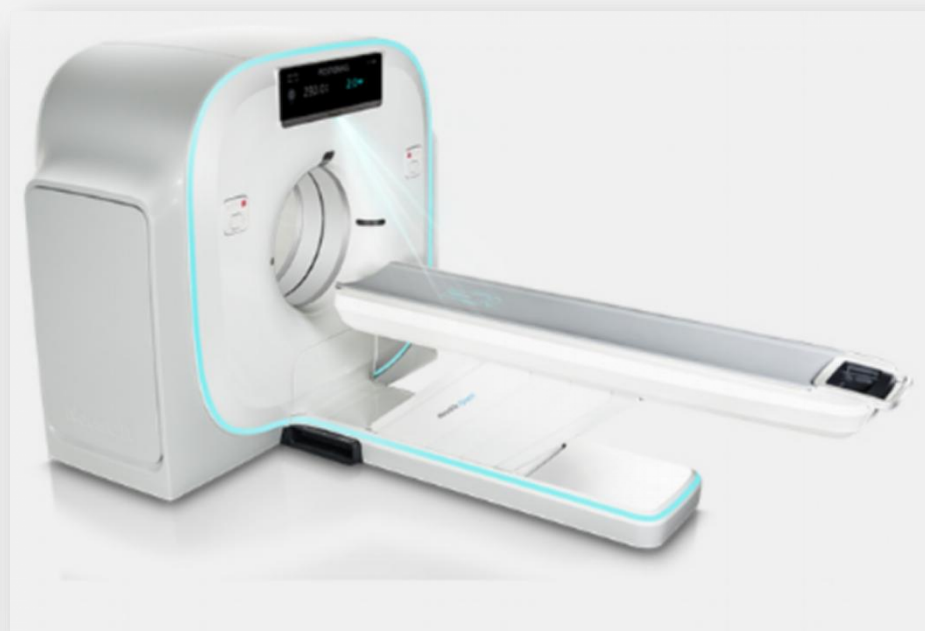


128排CT < 80 mm



> 256排CT 160mm左右

探测器越宽，单次采集的范围越大

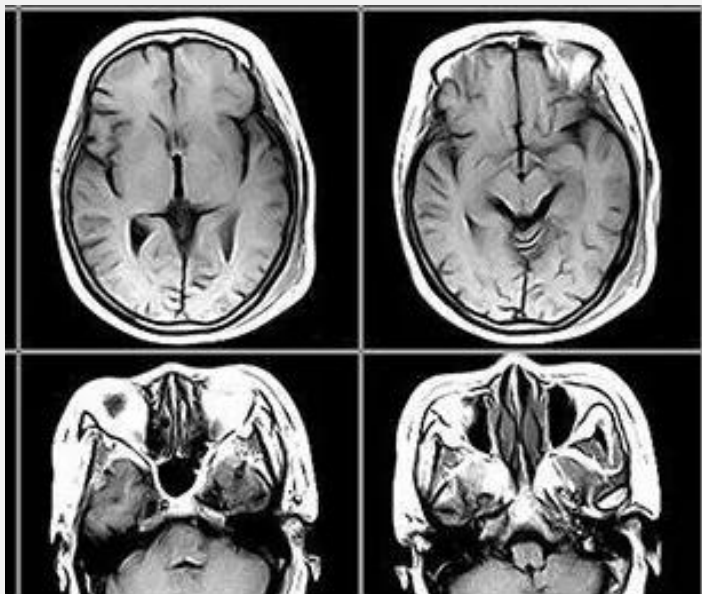


CTA影像（CT血管造影）

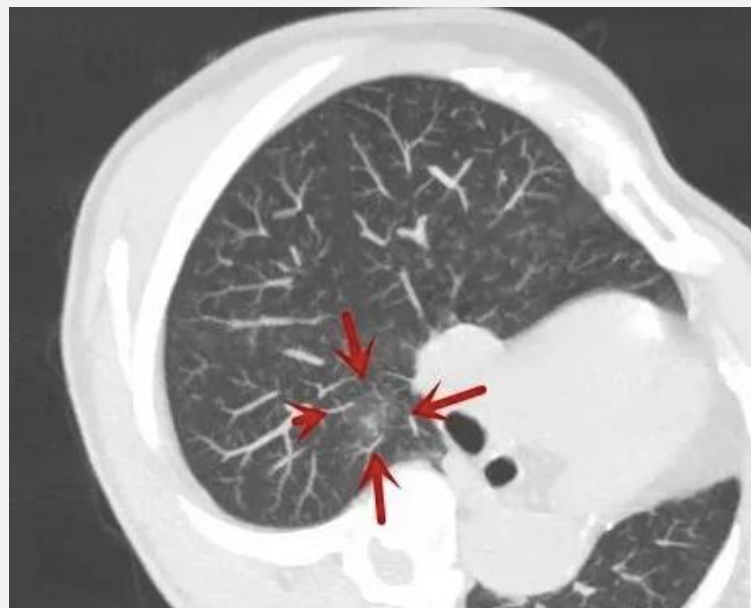
冠心病、结构性心脏病、房颤、心衰等患者都可以实现快速而精准的影像学检查。

## CT检查：人体多种疾病影像诊断的重要手段

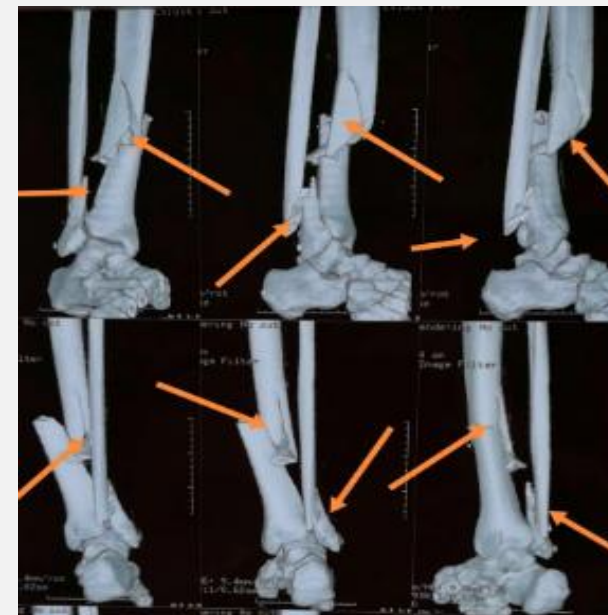
CT检查无创、快速、各种禁忌症相对较少，检查适应症非常广，可以适应于身体各个器管。



脑部疾病检查影像



肺癌检查影像



骨折影像，辅助治疗

用于筛查**头部**（脑梗塞/脑出血/头颈部疾病等）、**胸部**（早期肺癌/肺炎/肺结核等）、**腹部**（男性前列腺/女性子宫等）、**内脏脂肪**（肥胖/心血管等）等的最为常见的医学检查影像技术。

## 一站式CT检查

胸痛是包含多种疾病的一种临床症状，其中危及生命的急性冠脉综合征、肺动脉栓塞和主动脉夹层被称为**胸痛三联征**，该类**疾病发病率高、起病急、死亡率高**，一旦延误诊断，极有可能危及生命。

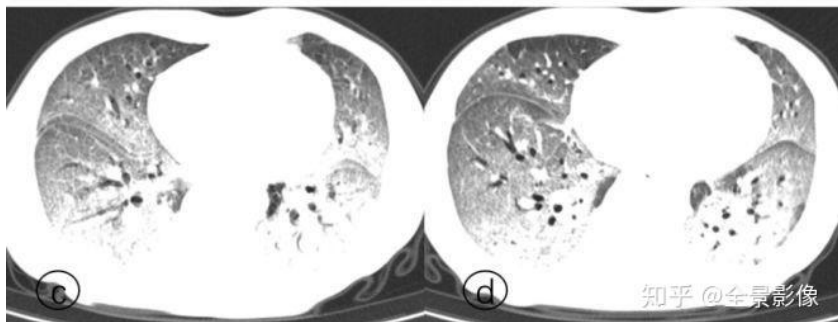
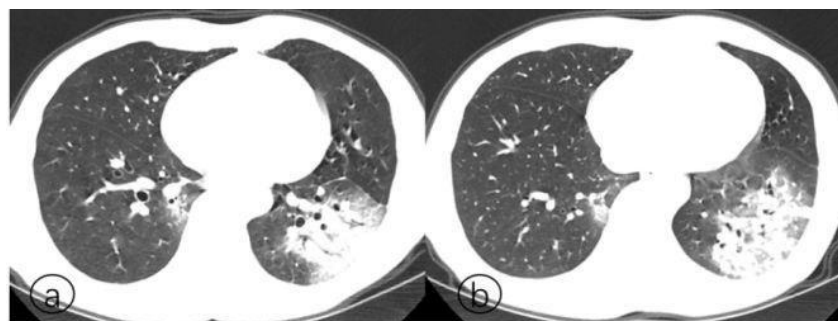


胸痛三联征CTA影像

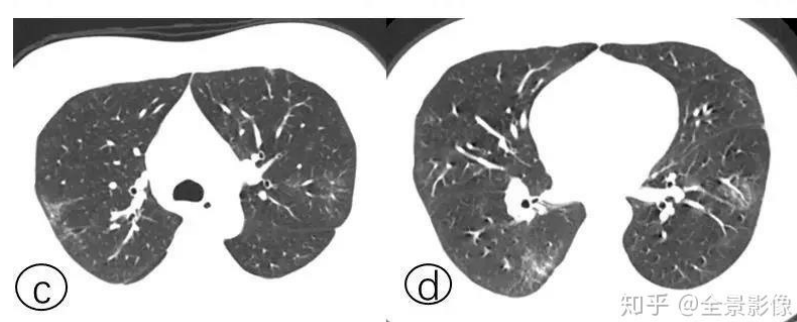
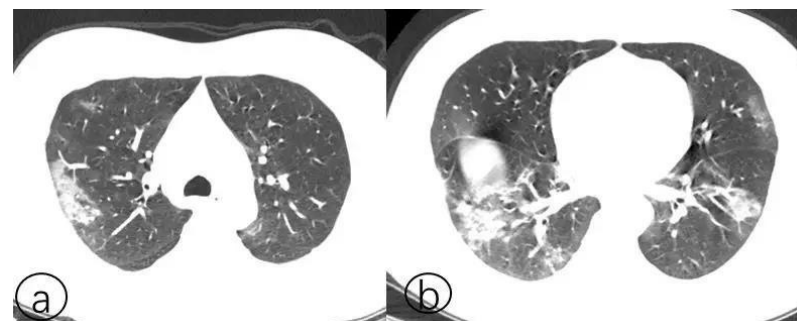
以往CT血管成像一次注射对比剂只能完成一支血管显像，“胸痛三联一站式CT检查”通过**一次注射对比剂短时间扫描可以同时获得“冠状动脉、肺动脉、主动脉”三支血管的显像**。几分钟内为急性胸痛患者找到了病情“元凶”，为患者的及时救治争取到更多宝贵的时间。

## ■ CT影像学检查是“新冠肺炎”诊疗中重要的一种检查手段

- 胸部CT检查在“新冠肺炎”中的诊断中举足轻重，其主要的作用是早期发现病灶，筛查疑似病例，为病情的发展提供影像证据。
- CT可以发现感染者肺部早期的病灶，速度快，各地区医疗机构的普及性较高



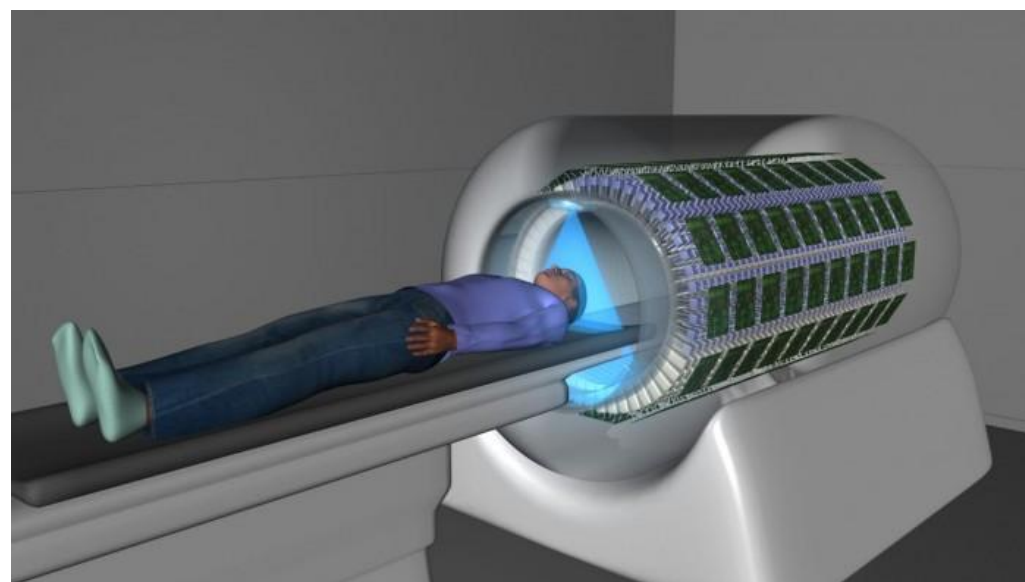
恶化



康复

新冠患者肺内病灶检测结果

- 将放射性示踪剂或探针引入人体后，放射性示踪剂/探针会到达特定的组织或器官，在体外用显像设备探测体内不同组织/器官放射性示踪剂分布情况，通过计算机重建成断层图像，反映不同组织/器官的**血流、功能与代谢状态**



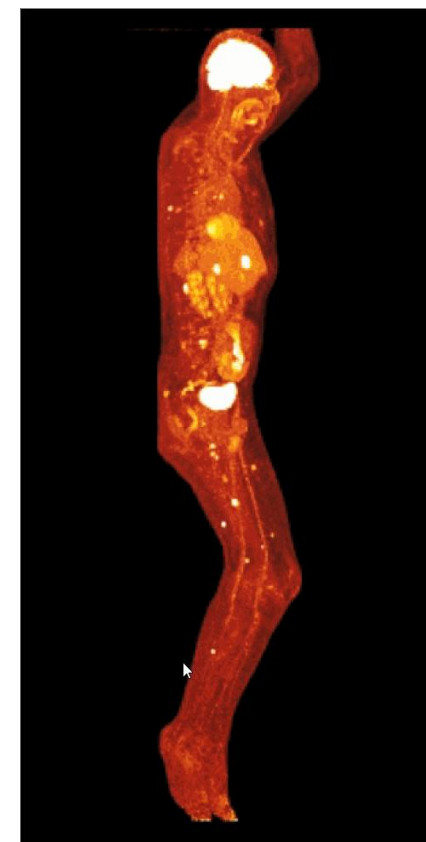
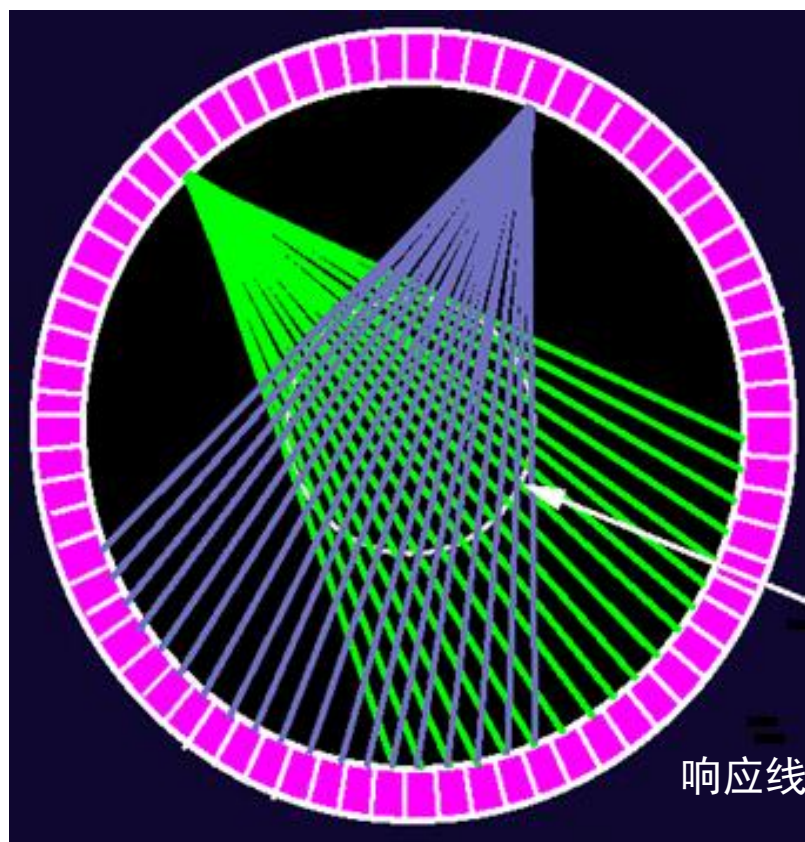
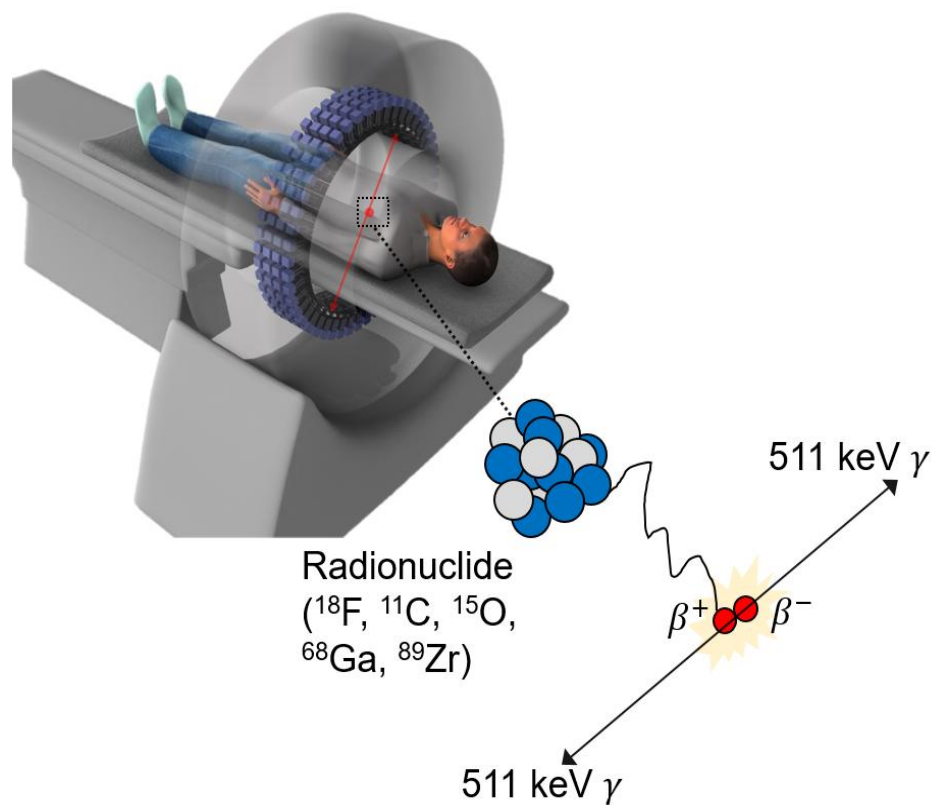
## 正电子发射断层显像

(Positron Emission Tomography, PET)



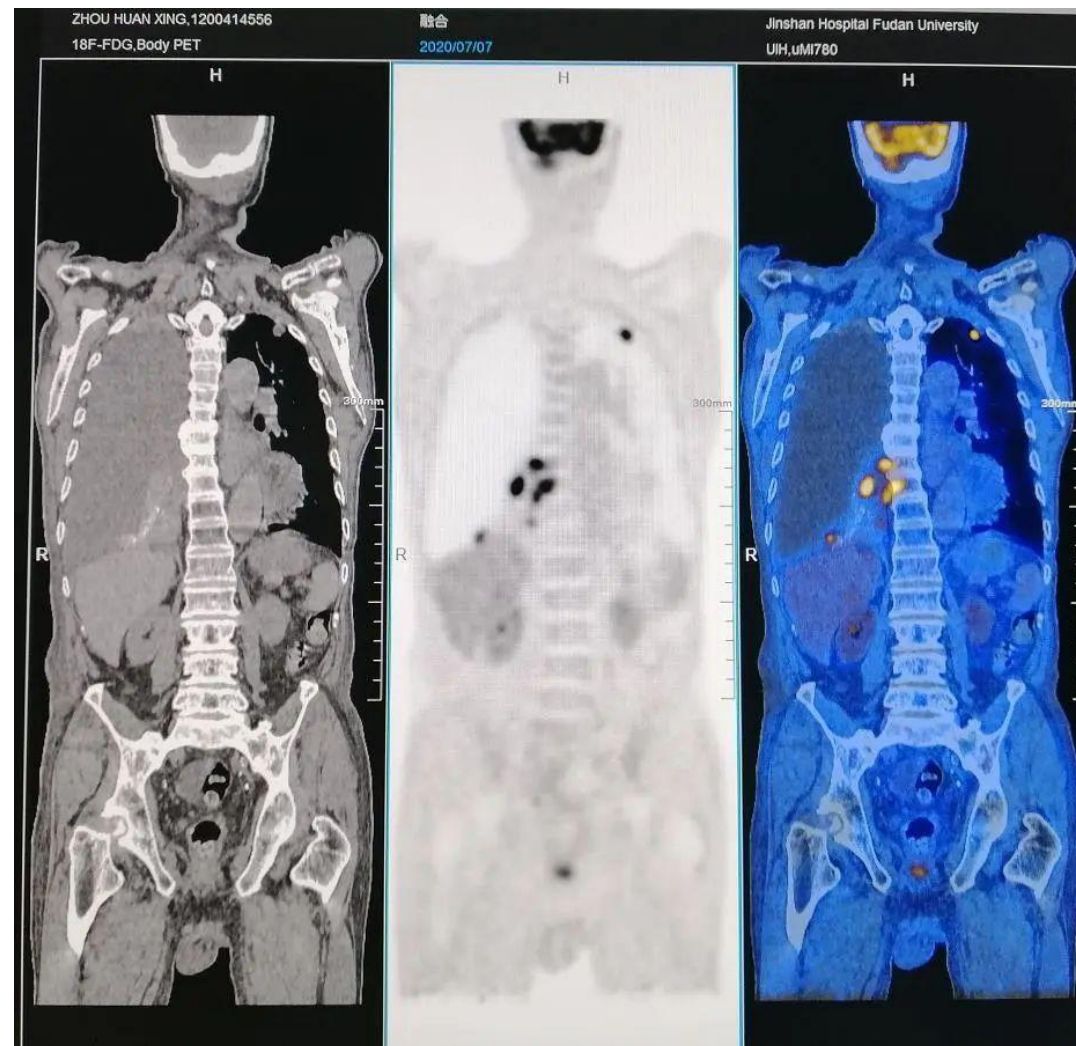


基本原理：药物（标记  $\beta^+$  衰变核素）衰变产生正电子，正电子湮没产生一对方向相反的  $\gamma$  光子，通过探测  $\gamma$  光子对，经符合判选后记录响应线数据，通过算法重建出体内核素分布图像。



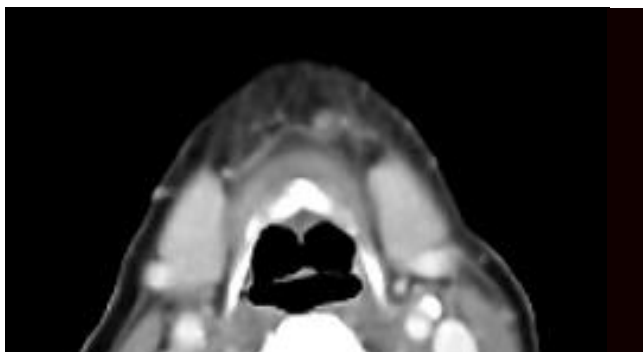
## PET临床应用

- 肿瘤的分期与再分期
- 肿瘤早期诊断及鉴别诊断
- 早期预测和评估放化疗疗效
- 寻找肿瘤原发灶
- 指导临床活检定位
- 确定放疗生物靶区，辅助放疗计划的制定
- 肿瘤术后残余复发和纤维机化组织的鉴别
- 评估恶性肿瘤的分化程度及预后

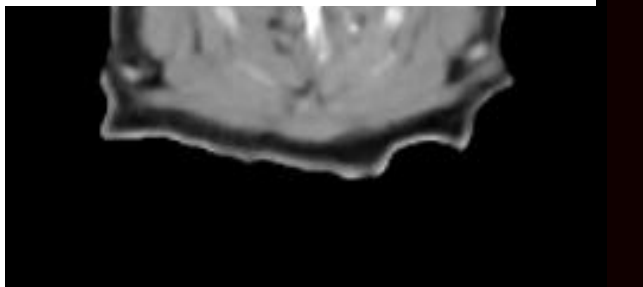


肿瘤早期诊断

- 常规影像学 → 现代影像学 → 分子影像学
- PET/CT是分子影像学的典型代表，是现代影像技术PET与CT的有机融合，是**功能影像**与**解剖影像**的融合，是**代谢功能**与**组织结构**的融合。



Structure without function is a corpse.  
Function without structure is a ghost.



融合图像准确定位淋巴结的摄取，从而清楚的定位清楚的位置，确认疾病扩散情况

融合成像  $1+1 \geq 2$

# 医用PET技术（与CT的多模态融合）



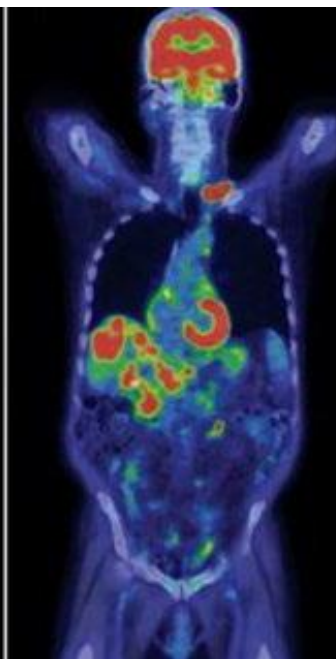
X 光透射成像



PET

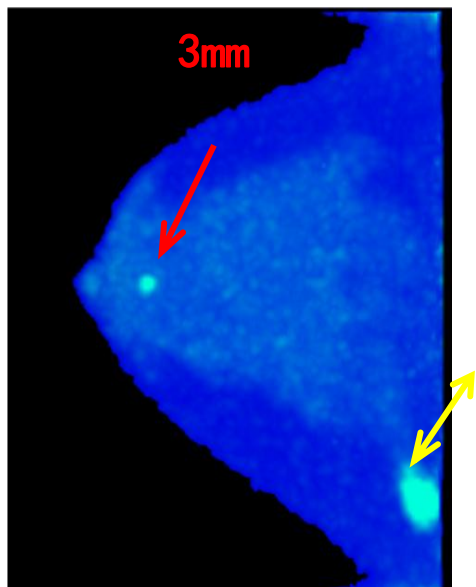


CT



PET/CT

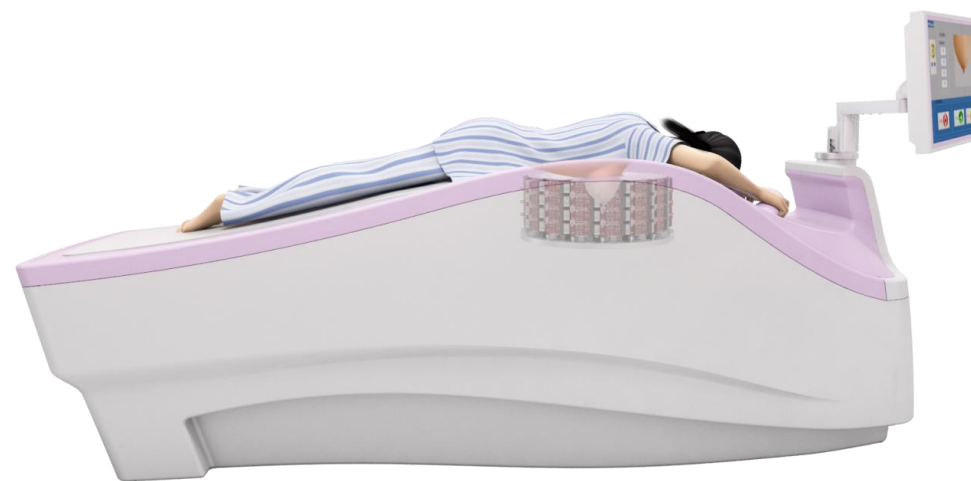
**PET/CT 扫描仪：**被《Time》周刊 评为 medical invention of the year 2000.



乳腺PET成像



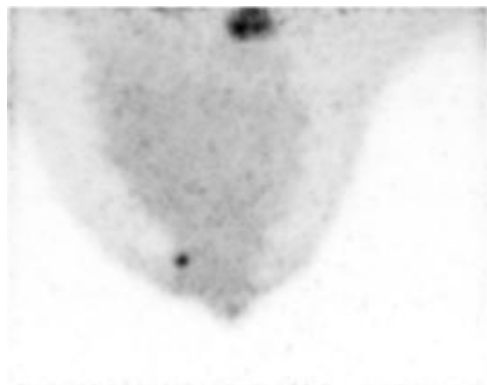
天津肿瘤医院安装现场



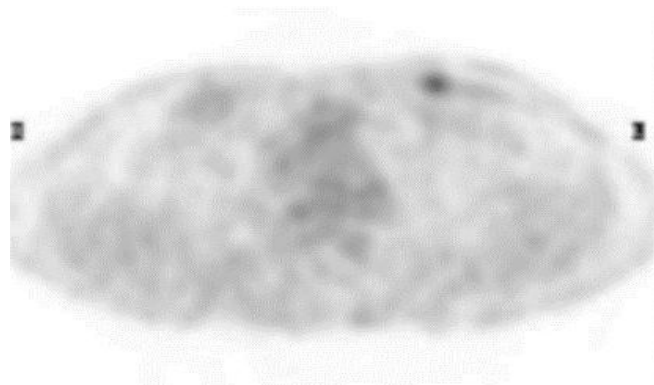
乳腺PET（国械注准20153331166）

- 国内首台乳腺PET，~500例实验病例，取得国家**三类医疗器械注册证**
- 国际**首批、国内唯一**进入市场应用的乳腺专用核医学成像设备
- 国际上先进的**乳腺癌早期诊断**设备，可以**精准定位极早期微小病灶并明确定性**，大幅提高生存率，降低治疗费用

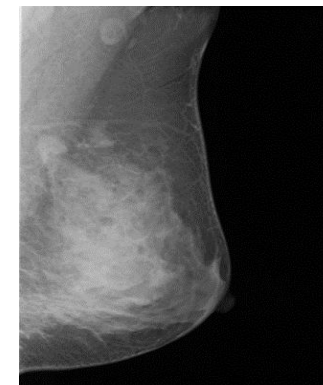
## 典型病例一：浸润性导管癌



乳腺PET: 一大一小病灶

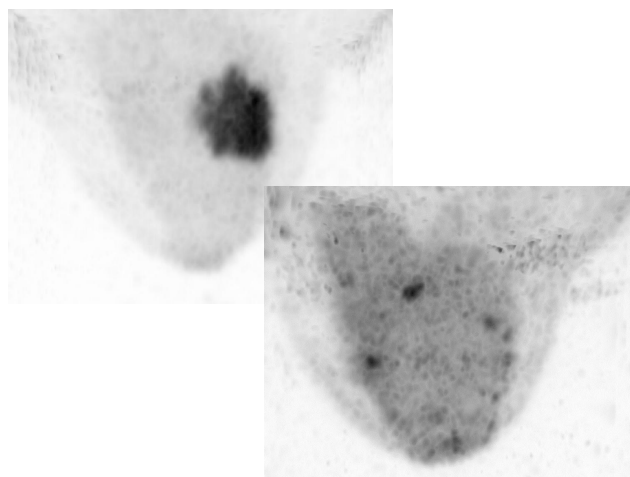


全身PET: 未发现小病灶

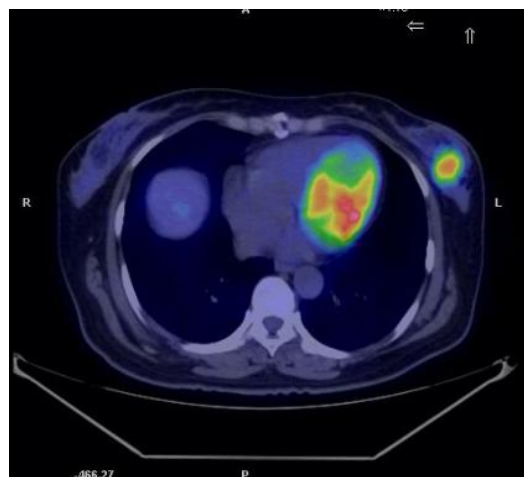


钼靶: 未发现小病灶

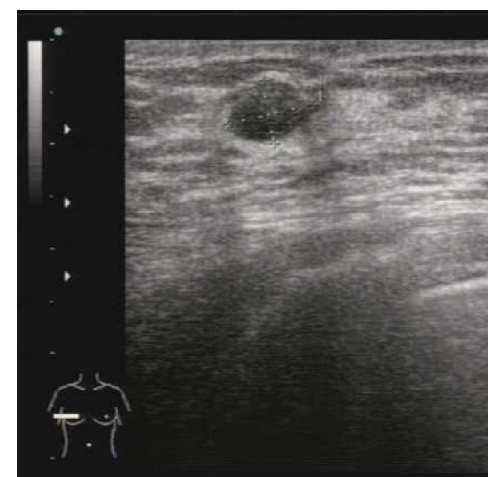
## 典型病例二：双乳浸润性导管癌



乳腺PET右乳多个小病灶



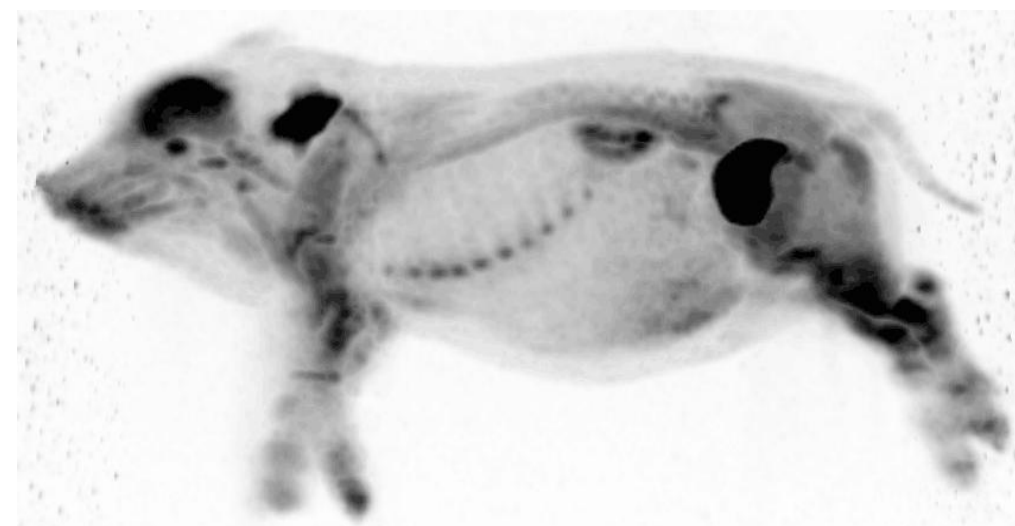
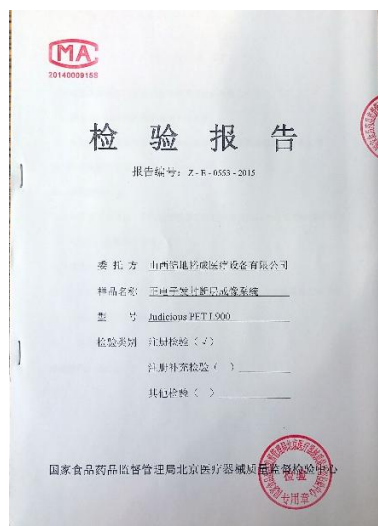
全身PET右乳低浓聚



右乳超声良性

# 全身PET成像系统

公司	SIEMENS			GE			PHILIPS			IHEP
型号	mCT	mCT 20Excel	Truepoint	Optima 560	Discovery 690 Elite	Discovery 690 VCT	Ingenuity TF	Gemini TF Big Bore	Gemini TF	/
PET探测器直径(mm)	842	842	842	886	886	886	900	900	900	890
入口直径(mm)	780	780	700	700	700	700	700	850	700	700
轴向FOV(mm)	216	162	216	157	157	157	180	180	180	216
径向分辨率 (1cm)	4.4	4.4	4.2	5	4.9	4.9	4.7	4.7	4.7	4.5
轴向分辨率 (1cm)	4.5	4.5	4.5	5.6	5.6	5.6	4.7	4.7	4.7	3.4
系统灵敏度 (kcps/MBq)	9.7	9.7	8.0	8.9	8.9	9.3	6.6	6.6	6.6	13.4



2

## ■ X/γ 射线医学影像设备发展趋势



## ■ 球管技术、滑环技术

CT核心部件，球管大热容量、高散热率和高毫安输出；高速滑环，以保证快速、大范围检查。

## ■ 探测器技术

CT核心部件，低噪声、大覆盖宽度、小层厚，以保证大范围、薄层高图像质量检查。

## ■ 计算机、算法及处理技术

计算速度快、定量、AI，临床诊断更科学化、智能化。

- ✓ 更大检查范围
- ✓ 更高分辨率
- ✓ 更快检查时间
- ✓ 更低剂量

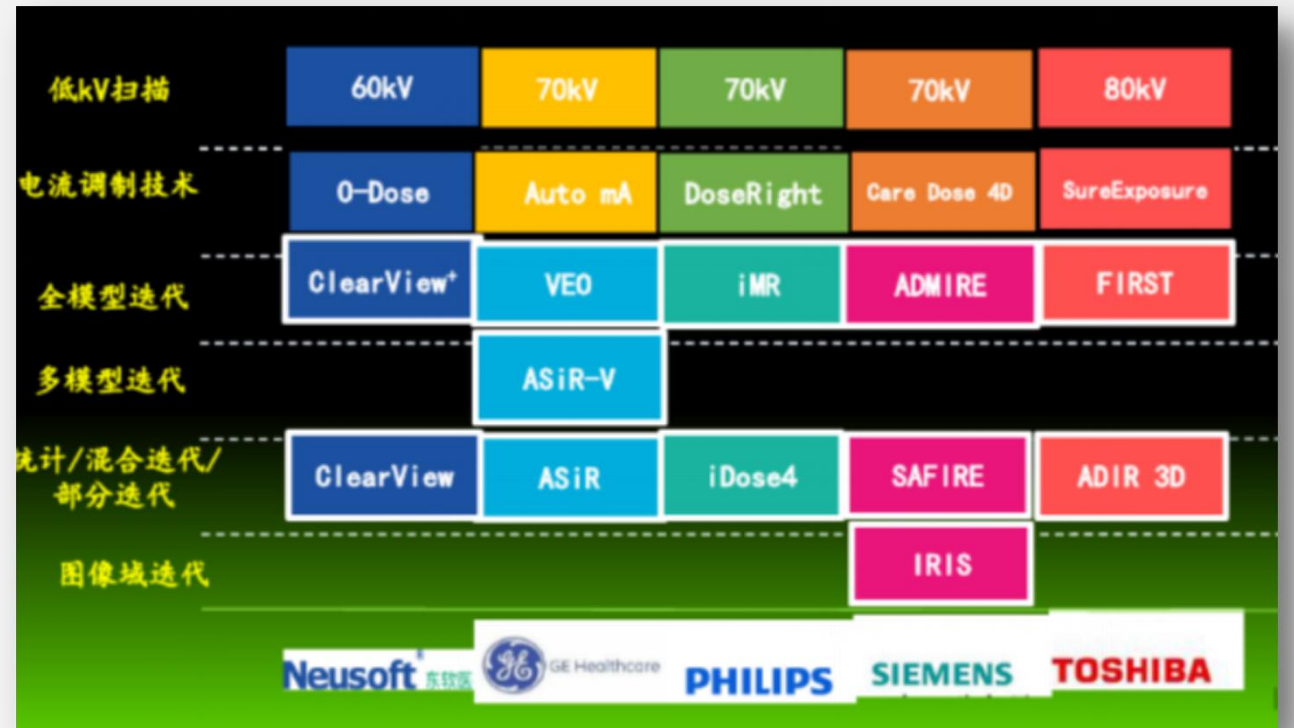
最初只能扫描头部 → 用于全身各个部位检查

单排往复式扫描 → 螺旋CT  
→ 多排螺旋CT  
→ 宽体螺旋CT

**低剂量技术：** 在保证影像诊断的前提下，合理采用CT扫描参数等低剂量技术，降低被检者的X射线剂量。

## 低剂量技术

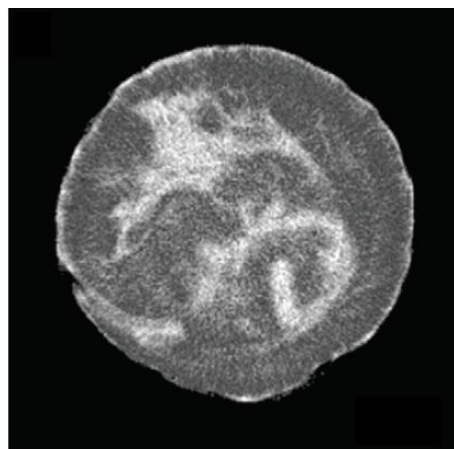
- CT扫描参数（心电门控、螺距等）
- mAs 自动实时调制技术
- 自动kV选择技术
- 硬件（探测器、射束调制、防散射栅等）
- 重建算法（迭代重建）
- 深度学习降噪



各公司低剂量技术

低剂量胸部CT适用于单位组织的健康体检及高危人群普查、肺癌筛查；适用于短期内多次复查及需要长年随诊观察的病人。低剂量螺旋CT在肺癌高危人群进行肺癌筛查能降低20%的肺癌死亡。

## 传统CT-黑白成像

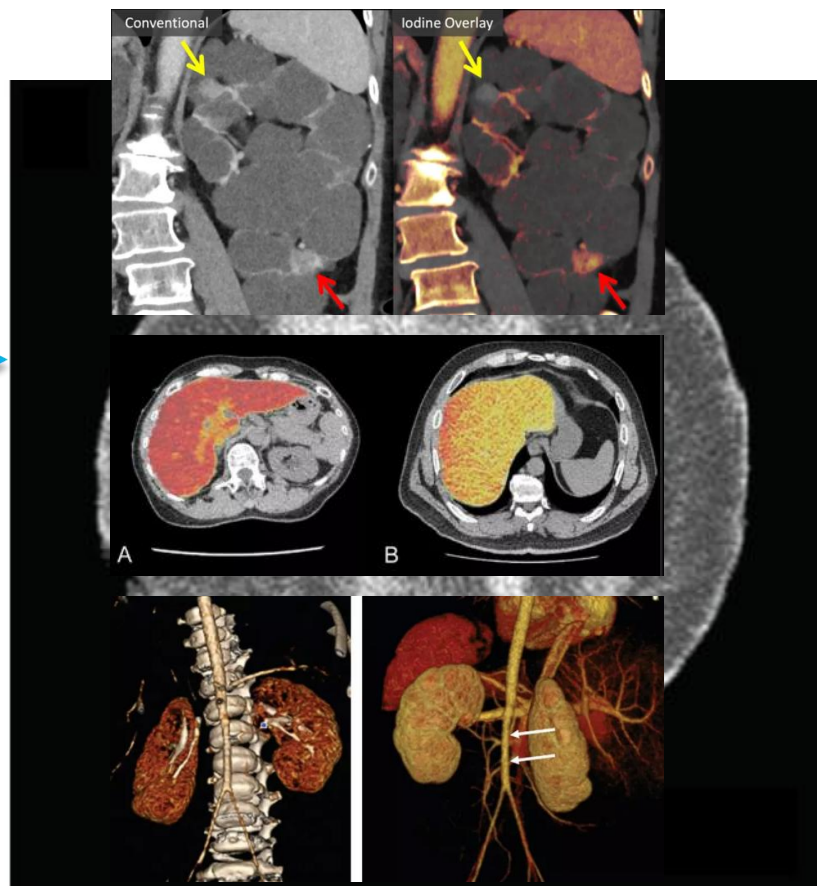


无物质识别能力  
不同成分可能会有相同CT值

发展

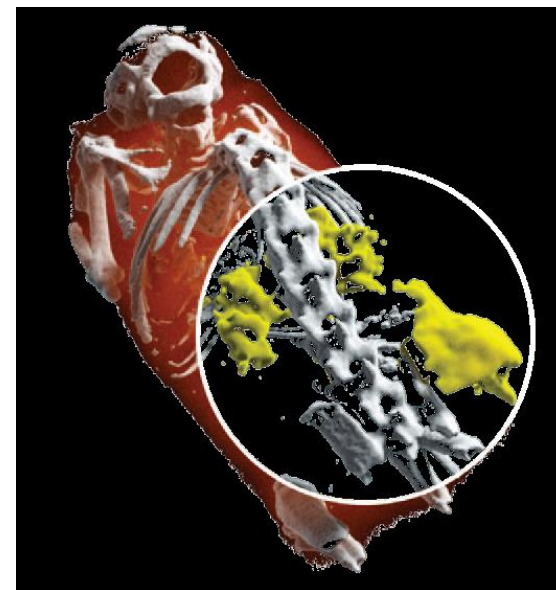


## 多能谱CT-彩色成像



具备物质识别能力

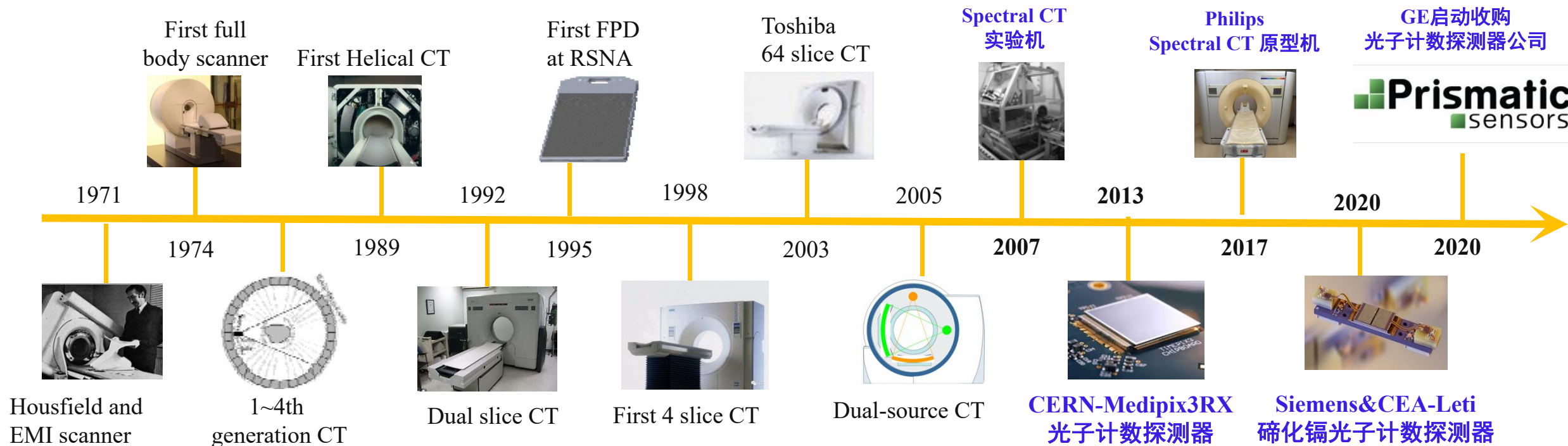
## 多能谱CT-功能成像



- 特定的元素 → 探针
- 早期病变 → 功能异常 → 图像值变化

- 高能所、清华大学等积极开展相关的研究工作

# 医用CT技术的发展



宽能谱 (电荷积分探测器)  $\xrightarrow{\text{能量分辨}}$  多能谱 (光子计数探测器)

近半个世纪来，CT技术先后经过了非螺旋CT，螺旋CT，多排CT等多个发展阶段

目前，多能谱CT已成为最新的发展方向之一

## ■ 球管技术、滑环技术

CT核心部件，球管大热容量、高散热率和高毫安输出；高速滑环，以保证快速、大范围检查。

## ■ 探测器技术

CT核心部件，低噪声、大覆盖宽度、小层厚，以保证大范围、薄层高图像质量检查。

## ■ 计算机、算法及处理技术

计算速度快、定量、AI，临床诊断更科学化、智能化。

- ✓ 更大检查范围
- ✓ 更高分辨率
- ✓ 更快检查时间
- ✓ 更低剂量

CT技术的发展史，一定程度上等同于探测器的发 展史！

最初只能扫描头部 → 用于全身各个部位检查

单排往复式扫描 → 螺旋CT  
→ 多排螺旋CT  
→ 宽体螺旋CT

# 医用PET技术发展趋势

在融合成像PET/CT、PET-MRI技术的基础上，着力突破PET成像的物理极限技术。

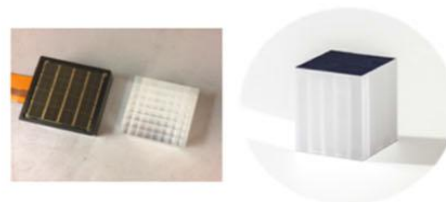
■ **空间分辨**：<2mm；**时间分辨**：~100ps，甚至10ps；**灵敏度**：几何灵敏度、TOF灵敏度共同发展

Spatial resolution

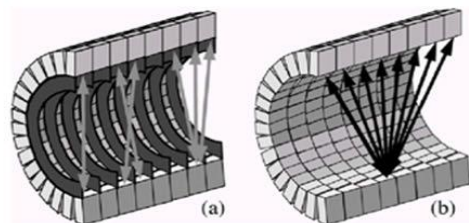
4-6 mm pixels with PMTs



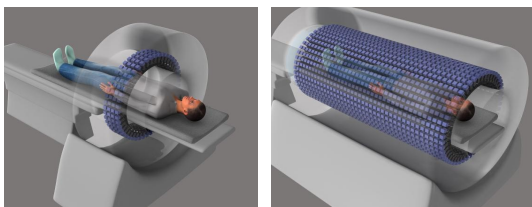
3-4 mm pixels with SiPMs



removing collimation



longer axial FOV



Geometric Sensitivity

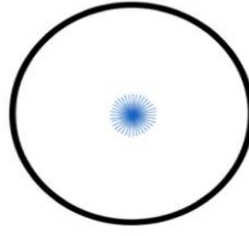
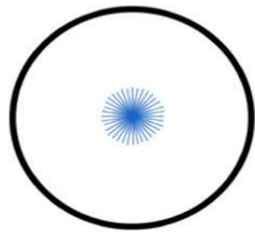
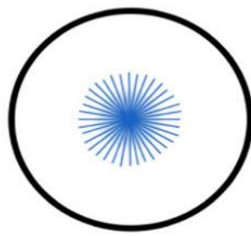
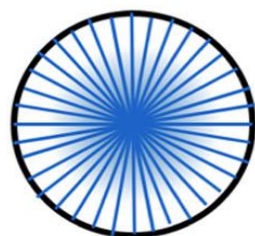
PET

500-600 ps

300-400 ps

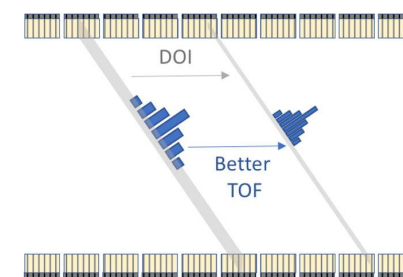
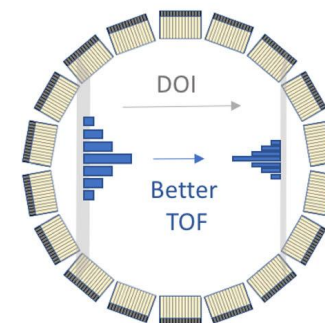
200-300 ps

Effective sensitivity by TOF



2000-2010

2015-2020



2020~.....

# 医用PET技术发展趋势

2000~2010

2010~2015

2016~ .....

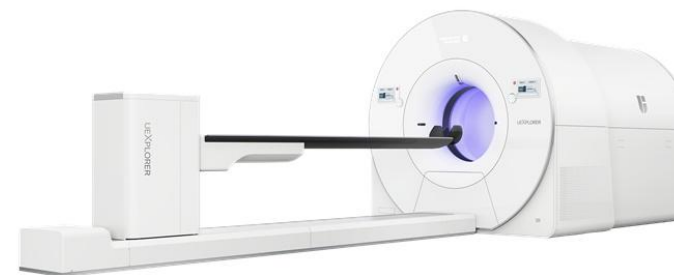
Micro-PET

PEM 样机

Micro-PET/CT

$\mu$ MI510

$\mu$ Explorer



2005

2008

2010

2015

2019

- 模态：单模态
- 整机状态：实验室样机
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：TOF、DOI技术起步

- 模态：PET/CT多模态为主
- 整机状态：用户、临床应用
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：TOF技术研究有所突破

- 模态：PET/CT、PET-MRI、多核素等多模态
- 整机状态：用户&临床应用、实验室先进技术研究
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：DOI技术、TOF技术、数字PET、Total-body技术等不断发展

# 医用PET技术发展趋势

2000~2010

2010~2015

2016~ .....

Micro-PET

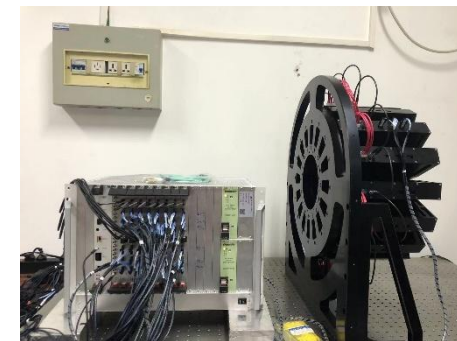
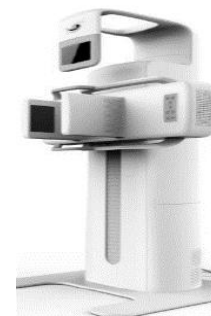
PEM 样机

Micro-PET/CT

CFDA 注册  
of PEM

MBI 系统

天然气水合物PET系统



2005

2008

2010

2015

2018

2022

- 模态：单模态
- 整机状态：实验室样机
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：TOF、DOI技术起步

- 模态：PET/CT多模态
- 整机状态：用户、临床应用
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：TOF技术研究有所突破

- 模态：PET/CT、PET-MRI、多核素等多模态
- 整机状态：面向应用
- 性能：空间分辨、灵敏度达到国际先进水平
- 技术：重点发展DOI技术、TOF技术，发展连续晶体探测器等国际领先技术



## 医学诊断

- ⑩ DR
- ⑩ CT
- ⑩ PET
- ⑩ SPECT

## 肿瘤治疗

- ⑩ 同位素靶向治疗
- ⑩ 电子束治疗
- ⑩ 质子束治疗
- ⑩ 重子束治疗
- ⑩ 中子束治疗

## 同位素生产

- ⑩ 显像用核素
- ⑩ 治疗用核素

## 医学诊断

■ DR

■ CT

■ PET

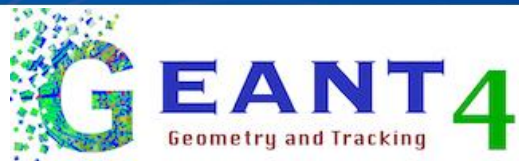
■ SPECT

- 射线与物质的相互作用
- 核医学/放射医学成像 《辐射成像原理与技术》
- 核医学/放射医学成像 医学物理师考试
- 核医学/放射医学成像 临床设备
- 高能物理与核物理学家 华尔街? 之外...

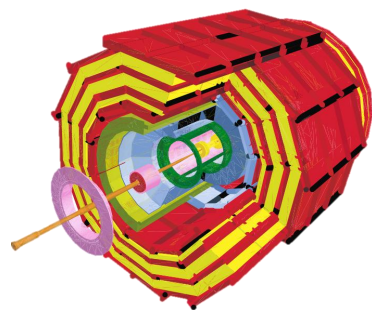
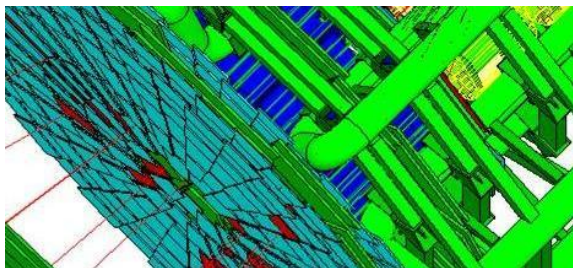
3

# ■ 高能物理核物理助力医学诊断

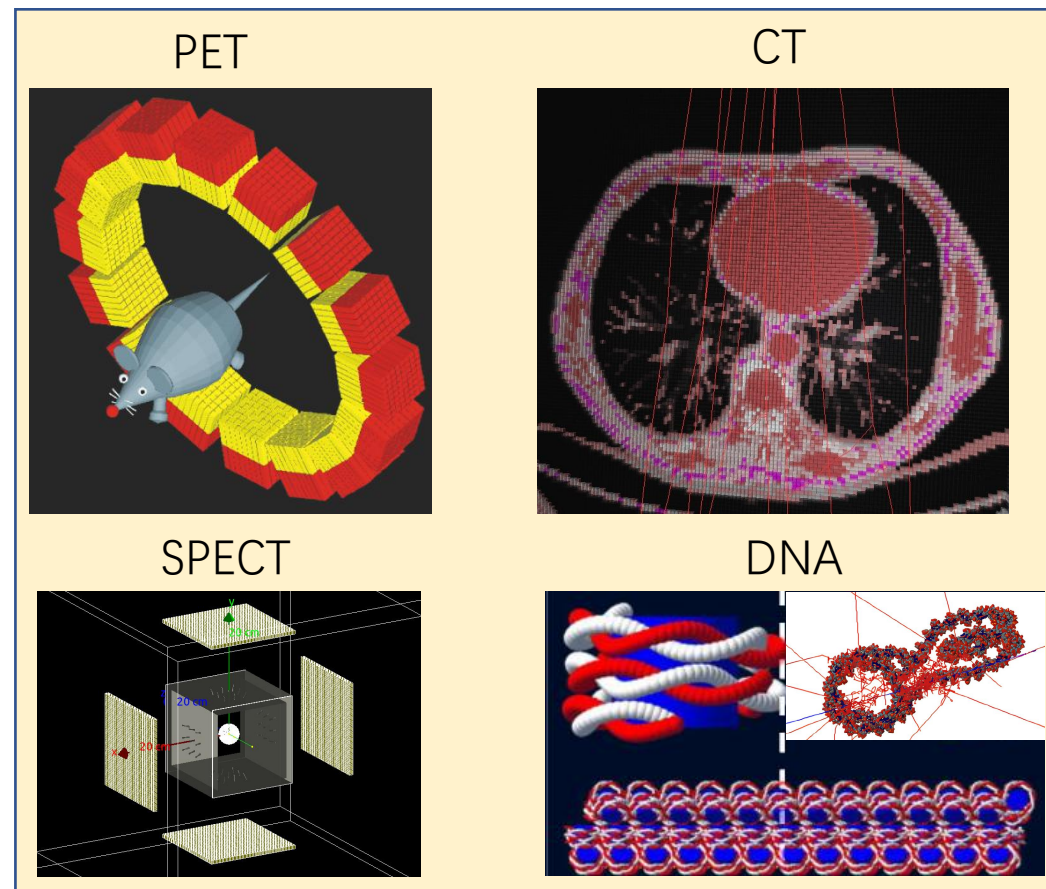
- 模拟仿真
- 能谱测量技术应用于CT成像
  - 光子计数探测器
  - 大规模电子学技术
  - 高速数据传输技术
- 时间测量技术应用于PET成像
  - 时间测量技术
  - 电子学技术
  - 高速数据传输技术



- Geant4开发动机：为了LHC寻找希格斯粒子的模拟需求，1994年CERN成立了proto-Geant4 项目组。1999年面世
- 该工具包能够模拟丰富的物理过程，以处理广泛能量范围内粒子与物质的各种相互作用
- 应用领域：高能物理、空间科学、医学…

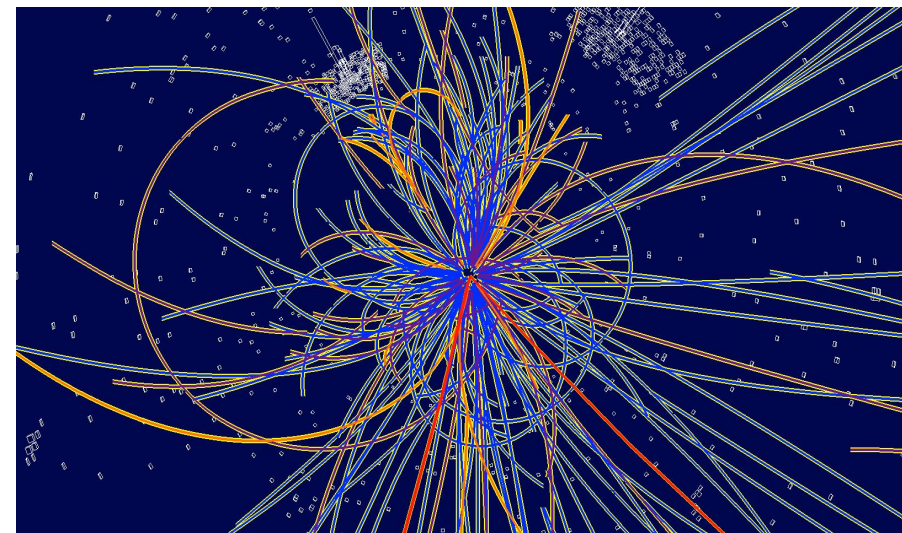
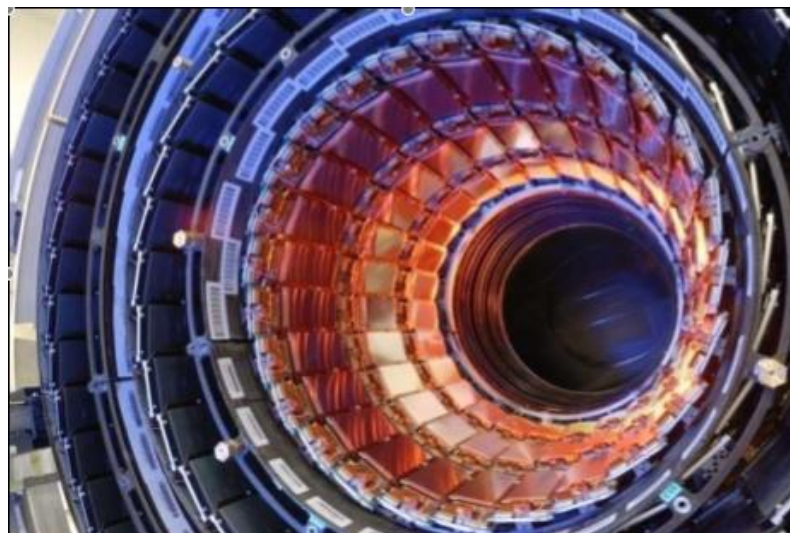
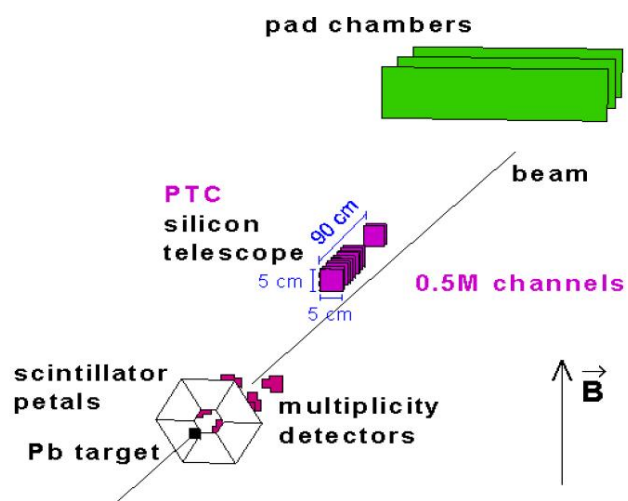


- 目前核医学诊断领域广泛应用Geant4做系统设计、参数评估。也有基于G4开发的专用模拟软件GATE
- 使用人员规模庞大

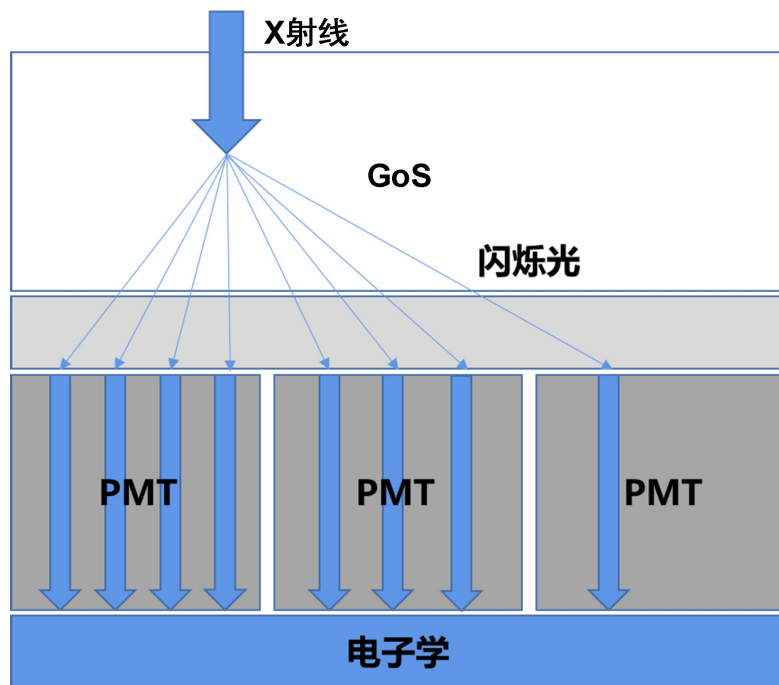


## ■ 光子计数型探测器

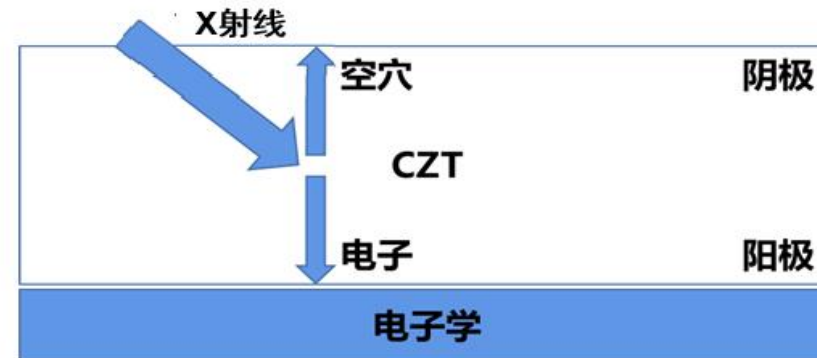
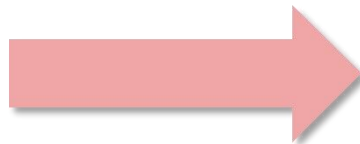
- 1984年由S. Gaalema在IEEE NSS上首次提出，展示了其可能性和潜力
- 20世纪90年代初，LHC及SSC开始了探测器的实际应用研究，优先考虑重离子对撞实验
- 1994年美国超导超级对撞机(SSC)项目停止后，欧洲核子研究中心(CERN)继续进行了数年的研发工作，成功研制了基于Medipix系列芯片的探测器，用于进行粒子径迹的探测
- Medipix系列芯片的设计思想从高能物理领域被拓展到其他应用领域



## ■ 光子计数型探测器原理：



从间接到直接



光子计数型探测器可直接将X射线光子转换为电子，无需宏观光电转换过程，探测效率、能量分辨能力大幅提升；

## ■ 核心优势：

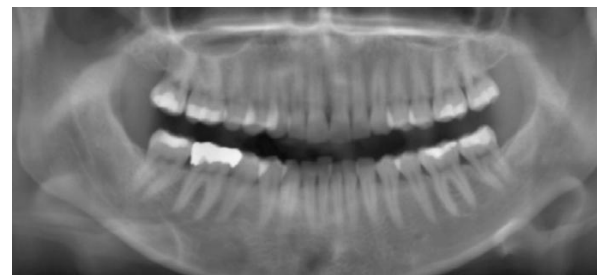
- **多能量阈值：** 能量分辨的能力使得探测器可以完成不同能量成像
- **高信噪比：** 可实现理论上的“零”电子学噪声；
- **高空间分辨率：** 百微米级以下的像素尺寸；

## ■ 光子计数探测器

- 直接转化型
- 较优的点扩展
- “零”噪声
- 能量分辨

## 能谱CT成像技术

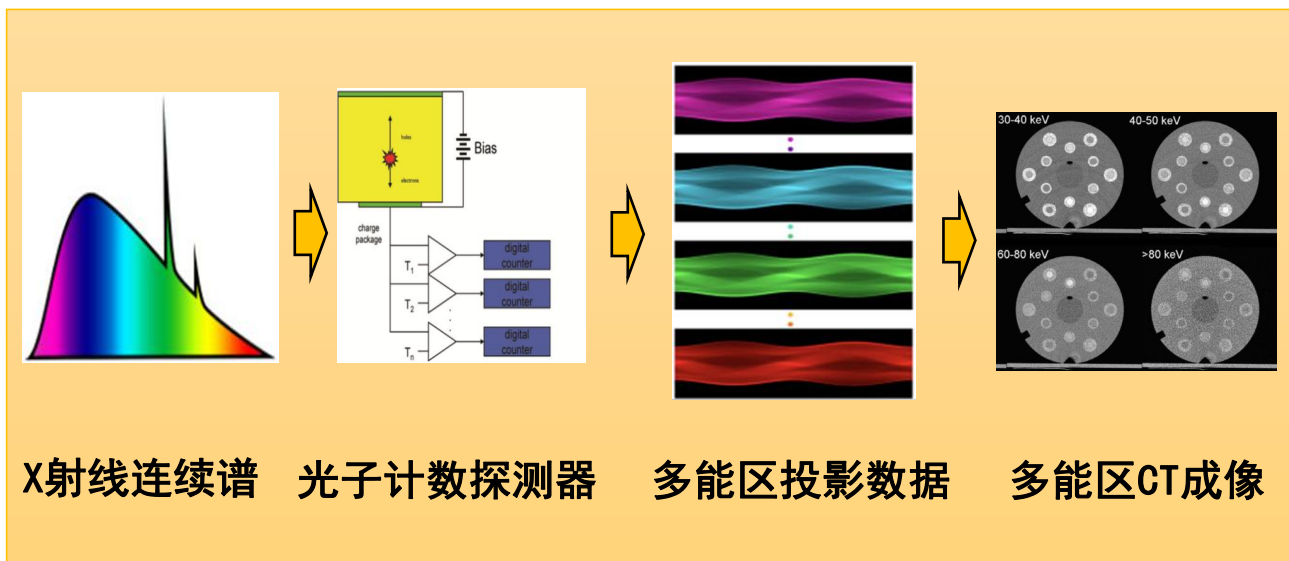
- 较优的空间/密度分辨
- 辐射剂量降低
- 图像伪影抑制
- 吸收边等新型成像



电荷积分探测器



光子计数探测器



K-edge imaging of iodine



# 能谱测量技术应用于CT成像

应用需求发展



技术要求



技术发展趋势



高分辨率，快成像速度，高清晰成像，物质识别

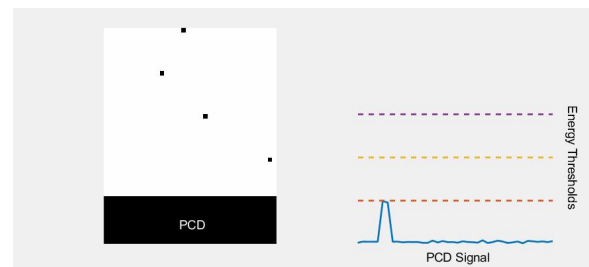
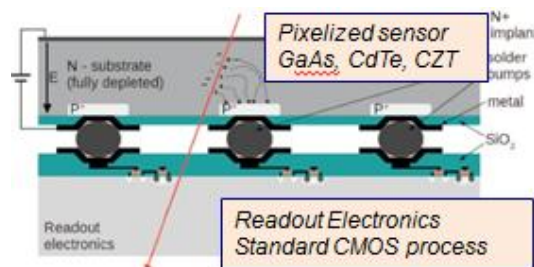
高探测效率

能量分辨

高计数率

小像素

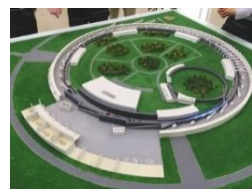
低噪声



混合像素式架构

能量分辨光子计数探测器

应用领域



高能步辐射光源



医学CT



无损检测仪



衍射仪



相衬成像



DR成像系统

# 能谱测量技术应用于CT成像

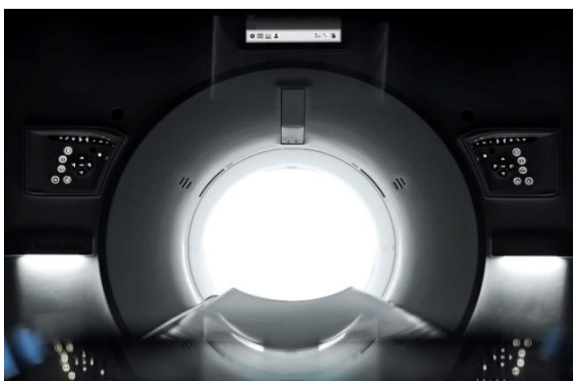
2017年



**Philips公司**

发布光子计数式能谱人体CT  
原型机

2020年



**GE公司**

收购Prismatic公司  
(深硅光子计数探测器技术)

2021年



**Canon公司**

收购Redlen公司  
(碲锌镉光子计数探测器技术)

2021年9月



**Siemens公司**

FDA批准世界第一台光子计数  
人体 CT-NAEOTOM Alpha

被FDA称为“CT领域近十年来首次  
取得的重大技术进展”

**光子计数探测器 + 多能谱成像技术**

**新一代CT技术：光子计数型能谱CT的时代已经来临**

# 能谱测量技术应用于CT成像

## News | Press Releases

For Immediate Release Contact [marketingcommunications@us.medical.canon](mailto:marketingcommunications@us.medical.canon)

September 9, 2021

### Canon Inc. to make Redlen Technologies a wholly owned subsidiary

TOKYO, Japan, September 9, 2021 — Canon Inc. (“Canon” ; Headquarters: Tokyo, Japan; Chairman and CEO: Fujio Mitarai) announced today that it has reached an agreement with Redlen Technologies Inc. (“Redlen” ; Headquarters: British Columbia, Canada; President and CEO: Glenn Bindley) to conclude a share transfer agreement, making Redlen a wholly owned subsidiary of Canon.

**kromek**  
safer and healthier world

About Detection Advanced Imaging CZT Latest

Latest

## Kromek and Analogic Announce Collaboration Agreement to Develop Next Generation Computed Tomography (CT) Detector Technology

19/04/2023

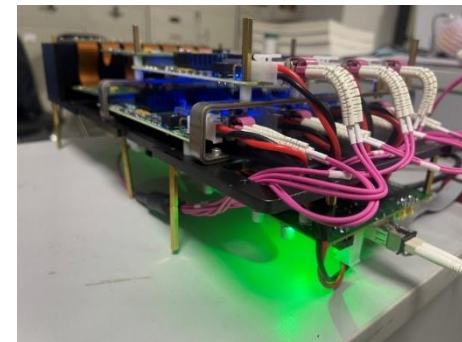
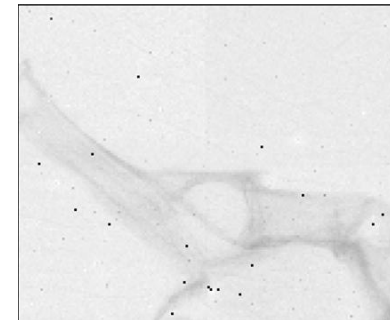
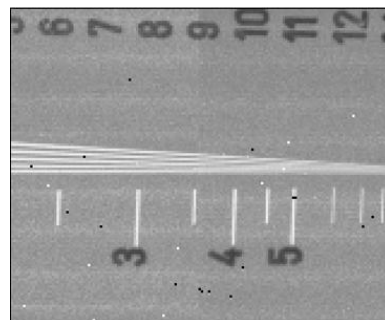
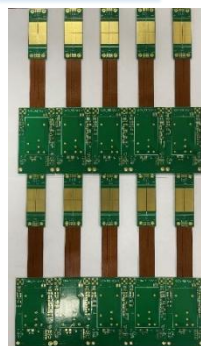
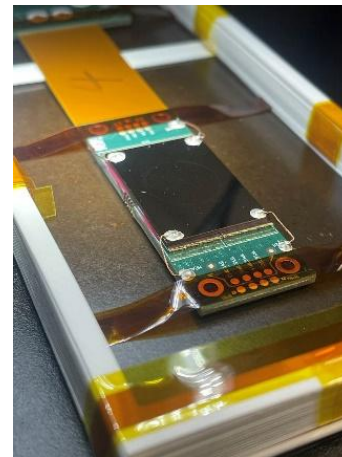
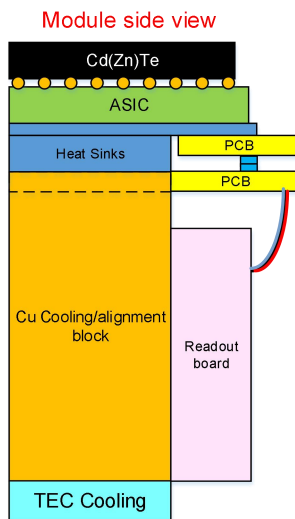
The screenshot shows the Siemens Healthineers website. At the top, there is a search bar and navigation links for '製品 & サービス', 'サポート情報', 'Insights', and '会社情報'. The main heading is 'About Acrorad' with the subtext 'We continue to challenge the Innovation of the radiation applications.' Below this, there are links for 'Our Company' and 'Products & Technologies', and a button for 'Acrorad Official Website'. The 'About Acrorad' section describes the company's role in fabricating CdTe semiconductor detectors for radiation measurement, mentioning their production line from raw material purification to wafer processing and assembly of X-ray imager modules. It also states that Acrorad is a member of Siemens Healthineers, a global healthcare company.

- Siemens 公司 收购 CdTe 龙头企业 Acrorad
- Canon 公司 收购 CdZnTe 龙头企业 Redlen
- GE 公司 收购 深硅探测器 龙头企业 Prismatic
- Analogic 公司 合作 CdZnTe 龙头企业 Kromek

# 能谱测量技术应用于CT成像

## HEPS-BPIX\_MTH

Process	SMIC 130nm – 8 metal
Pixel size	150 x 150 $\mu\text{m}^2$
Pixel arrangement	104 x 72
Acquisition modes	Single Photon Count
Readout Type	Frame-based
Energy Thresholds	4
Electronics noise	115 e-
Peaking Time	1.562 ns
Dead Time	20 ns
Power consumption	<u><math>\sim 36.6\mu\text{W} @ 1.2\text{V} / \text{pixel}</math></u>
Floorplan	3 sides buttable
TSVs possibility	YES. With 1.2mm periphery
Max Count Rate	$2.2 \times 10^8 \text{ counts}/\text{mm}^2/\text{s}$
Output bandwidth	395.366Mbps

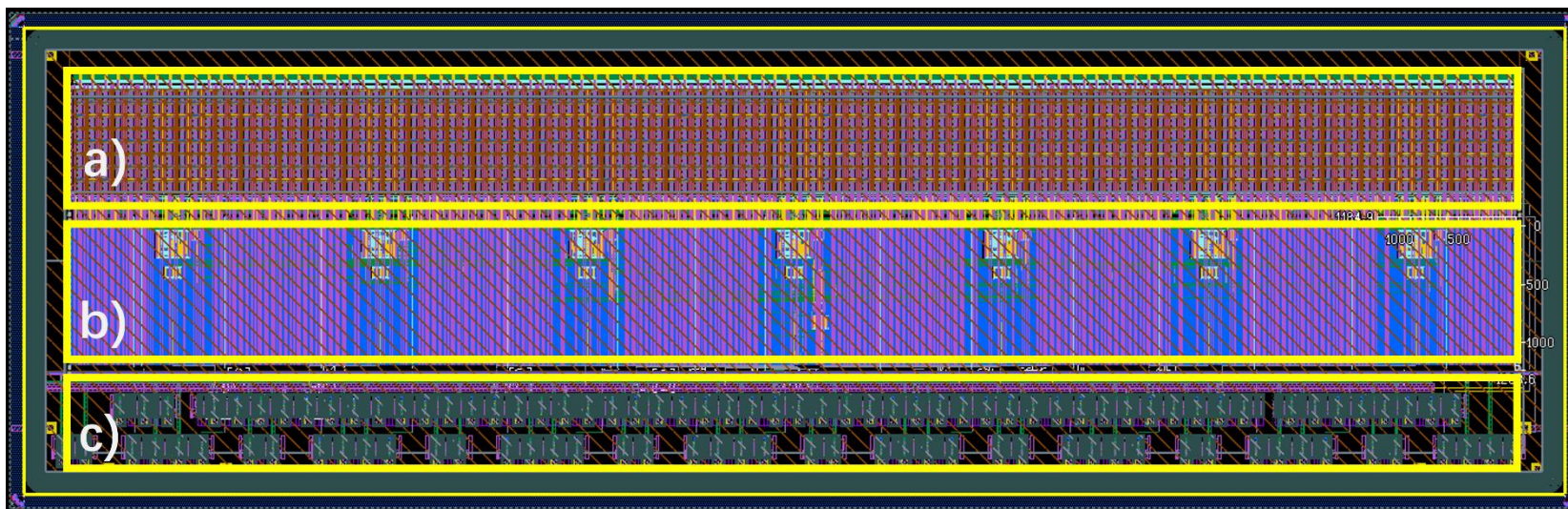


## ■ 光子计数探测器研制 (IHEP-INFN国际合作)

- 完成用于混合像素型探测器读出芯片的版图设计
- 完成基于LFoundry的110nm工艺制程MPW流片

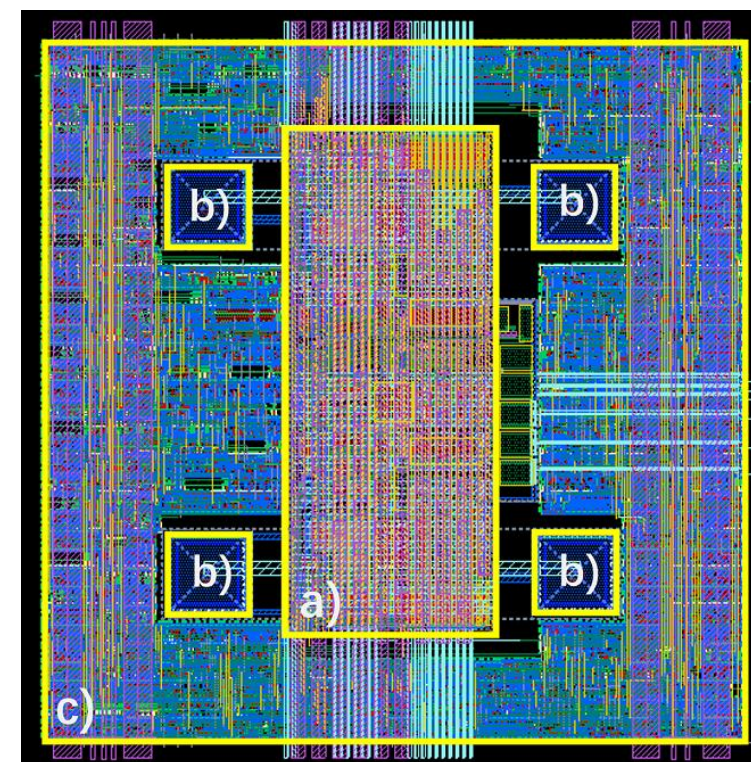


中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



芯片版图

(像素阵列 $8 \times 112$  + 外围读出电路 + 芯片管脚)



单像素版图

(模拟电路+ 电极+数字电路)

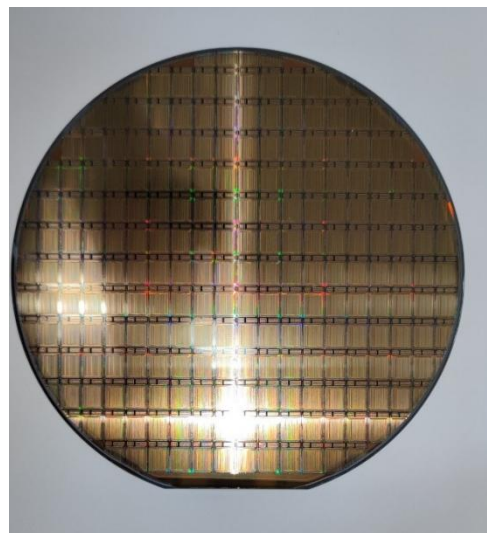
# 能谱测量技术应用于CT成像

## ■ 基于自研芯片的前端读出电子学系统

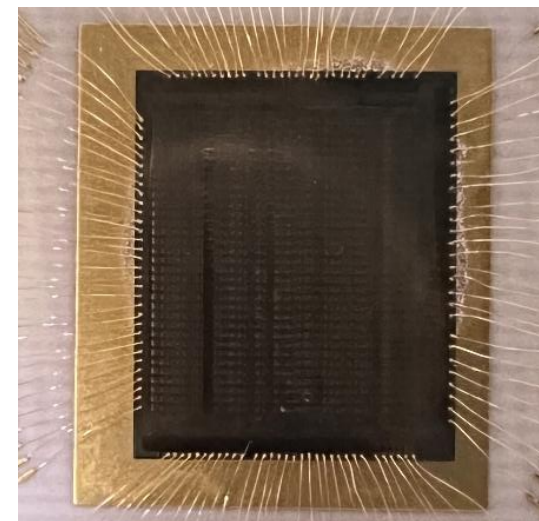
- 制作时间：2021年
- 工艺：CMOS 0.13 $\mu\text{m}$  3.3V/1.8V 混合信号工艺；
- 裸片尺寸：~10mm  $\times$  8mm；
- 通道数：32通道；ENC：80e<sup>-</sup>  $\pm$  12e<sup>-</sup>/pF
- 极性：正负可选；计数率：200k/s
- 电子学方案

→ 子板：芯片绑定 + 高精度刻度信号输入

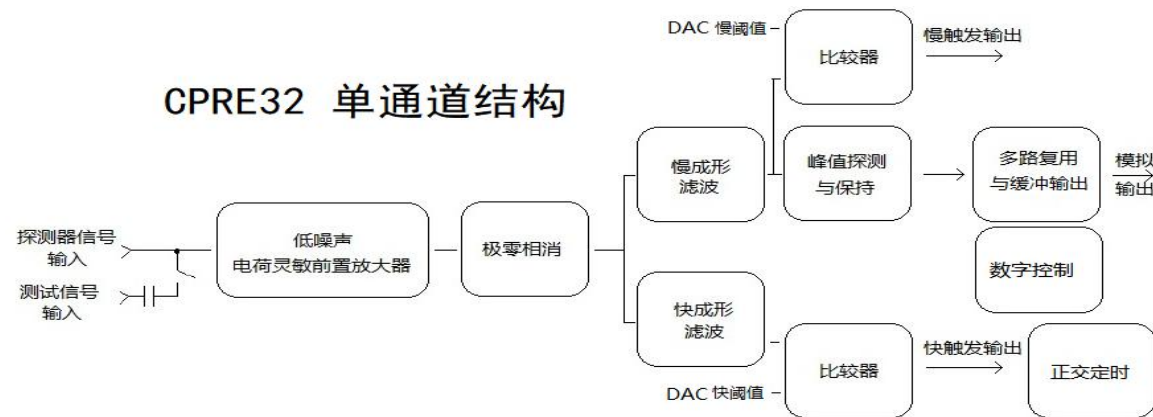
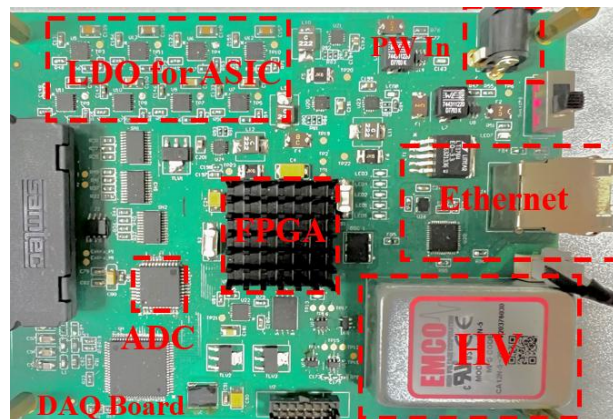
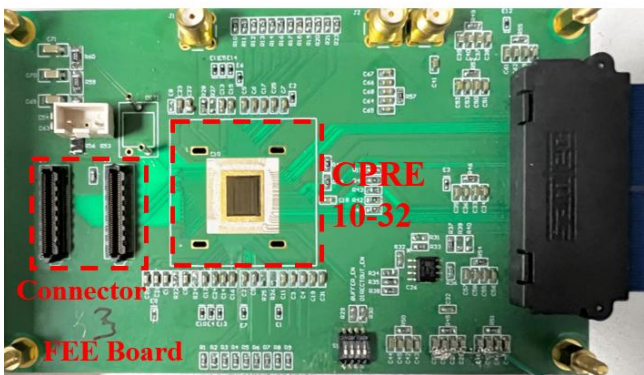
→ 母板：供电 + 数据处理



晶圆



32通道CPRE芯片



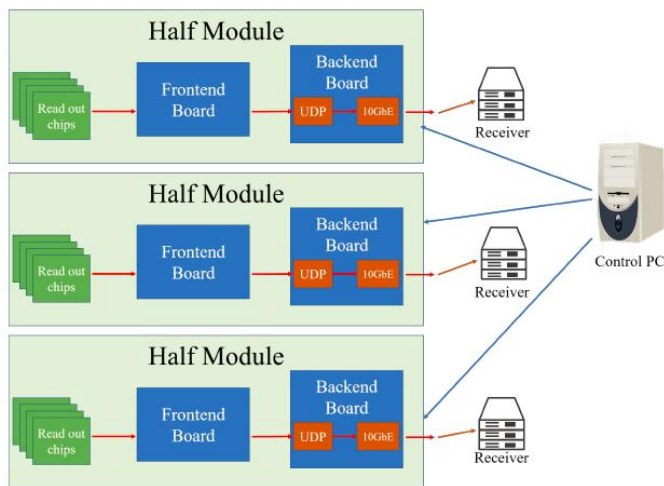
## 数据传输

### ■ 高能物理领域中探测器数据传输

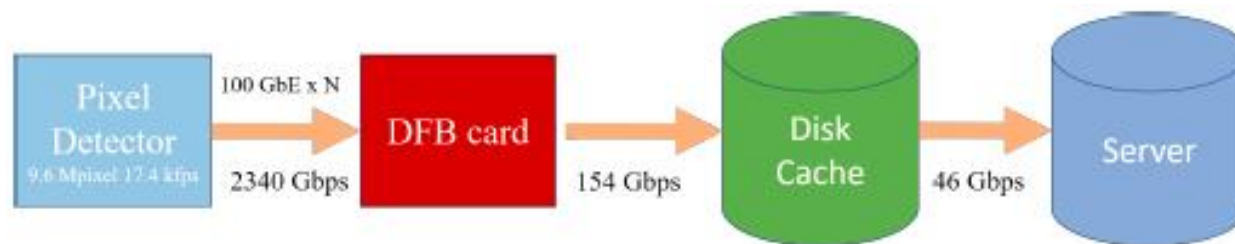
- **EIGER探测器（同步辐射光源）**：多条10Gbps以太网数据传输，带宽达360Gbps
- **DSSC探测器（欧洲XFEL）**：4条40Gbps传输通道，实现160Gbps数据带宽
- **CITIUS探测器（日本SACLA）**：多条100Gbps以太网数据传输通道，总带宽达2.3Tbps

### ■ 医学成像领域对数据传输需求

- 随着医疗成像设备中探测器像素数目增多，帧频越来越快，对数据传输带宽的要求也增大



EIGER探测器数据传输系统（10Gbps）

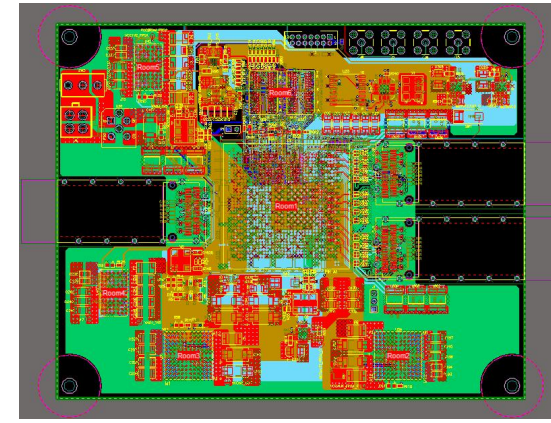
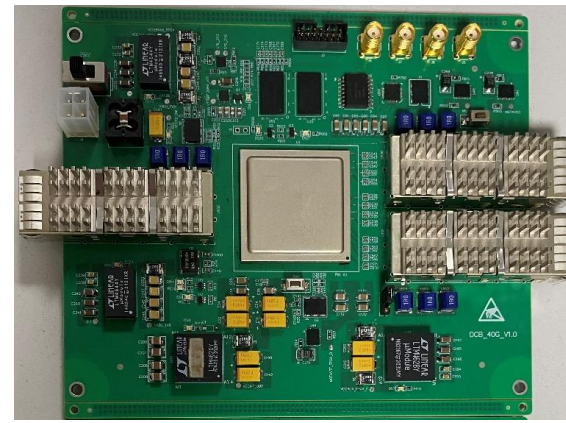
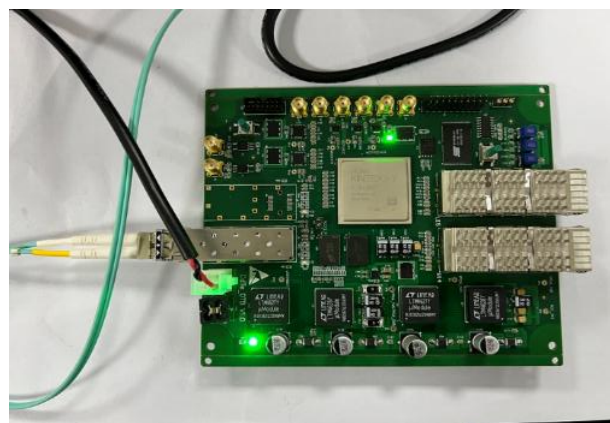


CITIUS探测器数据传输系统（100Gbps）

# 能谱测量技术应用于CT成像

## 数据传输

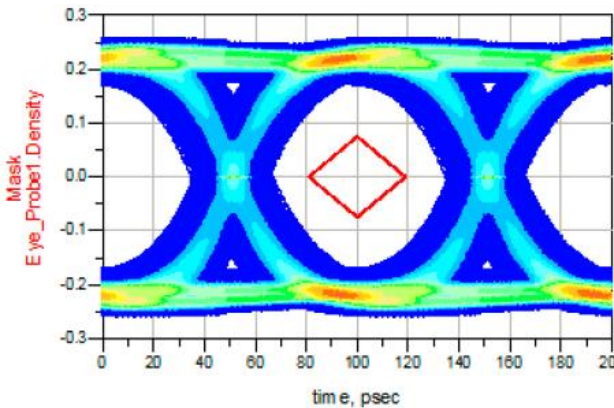
- 10G/40G高速以太网的数据传输技术，满足能谱CT及核医学系统的需求。



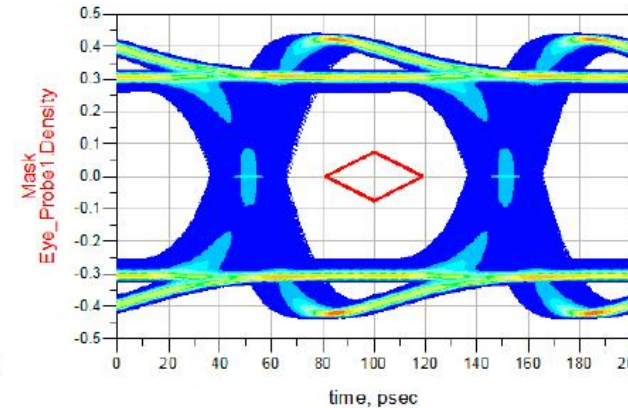
```
lans@lans-ThinkStation-P340: ~/桌面
rams
[ 5] 0.00-10.00 sec 9.38 GBytes 8.06 Gbits/sec 0.000 ms 0/6898117 (0%)
sender
[ 5] 0.00-10.00 sec 8.74 GBytes 7.51 Gbits/sec 0.001 ms 470459/6898092 (6.8%)
receiver

lperf Done.
lans@lans-ThinkStation-P340:~/桌面$ lperf3 -c 192.168.1.6 -u -p 8888 -b 10g -t 1
0 -w 425000 -l 9000
warning: UDP block size 9000 exceeds TCP MSS 1448, may result in fragmentation /
drops
Connecting to host 192.168.1.6, port 8888
[ 5] local 192.168.1.7 port 55283 connected to 192.168.1.6 port 8888
[ 5] Interval Transfer Bitrate Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec 1.09 GBytes 9.39 Gbits/sec 130486
[ 5] 1.00-2.00 sec 1.11 GBytes 9.56 Gbits/sec 132775
[ 5] 2.00-3.00 sec 1.11 GBytes 9.56 Gbits/sec 132779
[ 5] 3.00-4.00 sec 1.11 GBytes 9.53 Gbits/sec 132418
[ 5] 4.00-5.00 sec 1.11 GBytes 9.54 Gbits/sec 132470
[ 5] 5.00-6.00 sec 1.11 GBytes 9.53 Gbits/sec 132346
[ 5] 6.00-7.00 sec 1.11 GBytes 9.56 Gbits/sec 132773
[ 5] 7.00-8.00 sec 1.11 GBytes 9.56 Gbits/sec 132780
[ 5] 8.00-9.00 sec 1.11 GBytes 9.56 Gbits/sec 132774
```

10Gbps万兆以太网传输系统



index	...robe1.Height)	...robe1.Width)
0.000	0.369	7.800E-11



index	...robe1.Height)	...robe1.Width)
0.000	0.515	7.700E-11

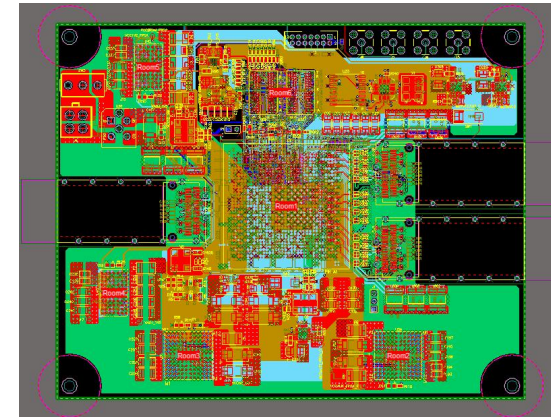
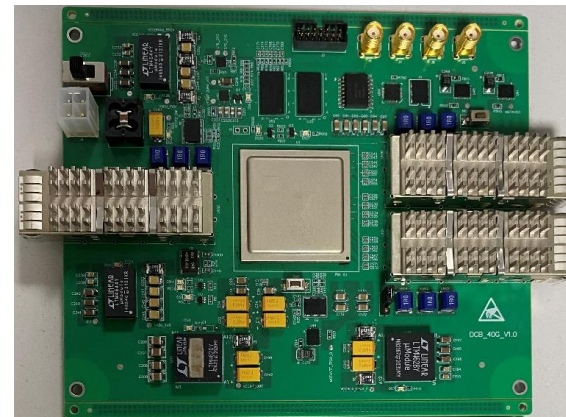
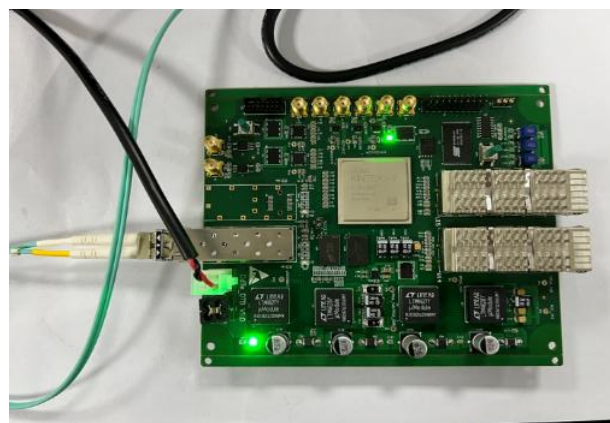
40Gbps数据传输板与信号完整性分析



# 能谱测量技术应用于CT成像

## 数据传输

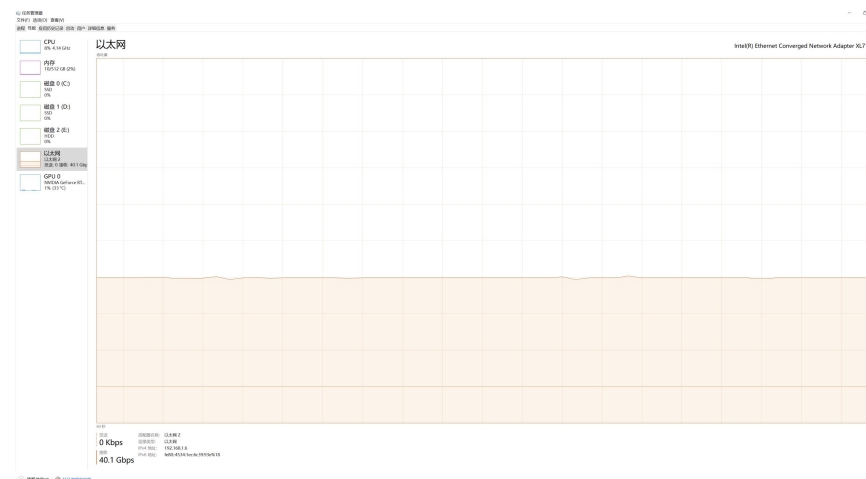
- 10G/40G高速以太网的数据传输技术，满足CT及核医学系统的需求。



```
lans@lans-ThinkStation-P340: ~/桌面
rams
[ 5] 0.00-10.00 sec 9.38 GBytes 8.06 Gbits/sec 0.000 ms 0/6898117 (0%)
sender
[ 5] 0.00-10.00 sec 8.74 GBytes 7.51 Gbits/sec 0.001 ms 470459/6898092 (6.8%)
receiver

iperf Done.
lans@lans-ThinkStation-P340:~/桌面$ iperf3 -c 192.168.1.6 -u -p 8888 -b 10g -t 10 -w 425000 -l 9000
warning: UDP block size 9000 exceeds TCP MSS 1448, may result in fragmentation / drops
Connecting to host 192.168.1.6, port 8888
[ 5] local 192.168.1.7 port 55283 connected to 192.168.1.6 port 8888
[ ID] Interval      Transfer      Bitrate      Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec  1.09 GBytes  9.39 Gbits/sec 130486
[ 5] 1.00-2.00 sec  1.11 GBytes  9.56 Gbits/sec 132775
[ 5] 2.00-3.00 sec  1.11 GBytes  9.56 Gbits/sec 132779
[ 5] 3.00-4.00 sec  1.11 GBytes  9.53 Gbits/sec 132418
[ 5] 4.00-5.00 sec  1.11 GBytes  9.54 Gbits/sec 132470
[ 5] 5.00-6.00 sec  1.11 GBytes  9.53 Gbits/sec 132346
[ 5] 6.00-7.00 sec  1.11 GBytes  9.56 Gbits/sec 132773
[ 5] 7.00-8.00 sec  1.11 GBytes  9.56 Gbits/sec 132780
[ 5] 8.00-9.00 sec  1.11 GBytes  9.56 Gbits/sec 132774
```

10Gbps万兆以太网传输系统

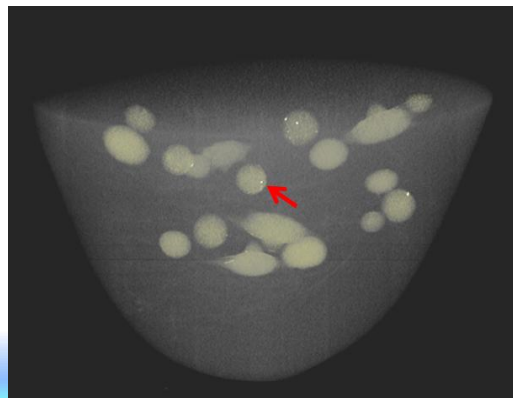


40Gbps以太网传输

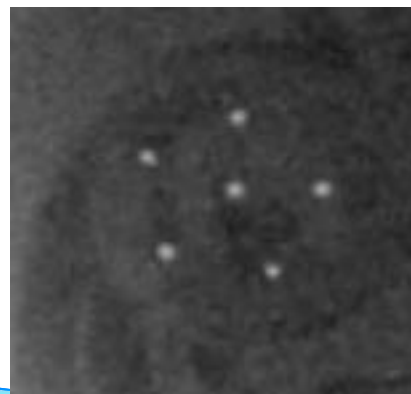
## 国家重点研发计划“数字诊疗专项”支持



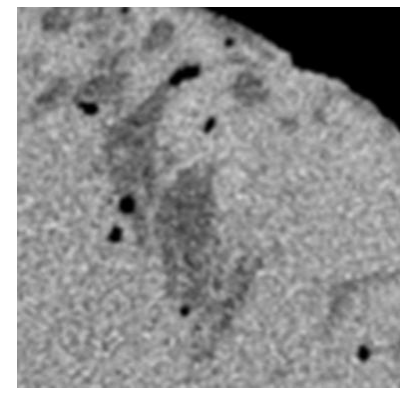
成像系统



三维立体成像



微小钙化识别



软组织衬度提升



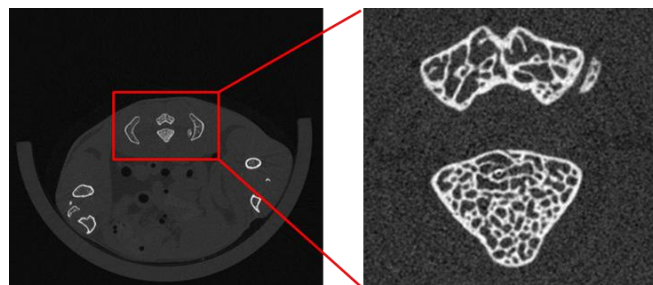
基于光子计数探测器的能谱成像技术，实现在较低的辐射剂量下，对微钙化点和细小肿瘤等病灶进行精确定位，提高乳腺癌普查的检出率

获第三届中国医疗器械创新创业大赛  
决赛三等奖（2020年9月）

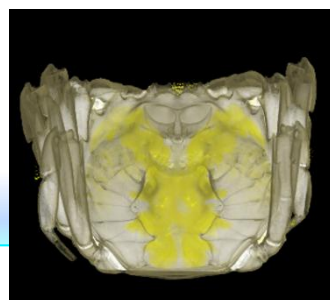
# 能谱测量技术应用于CT成像



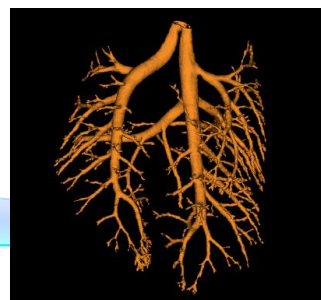
成像系统



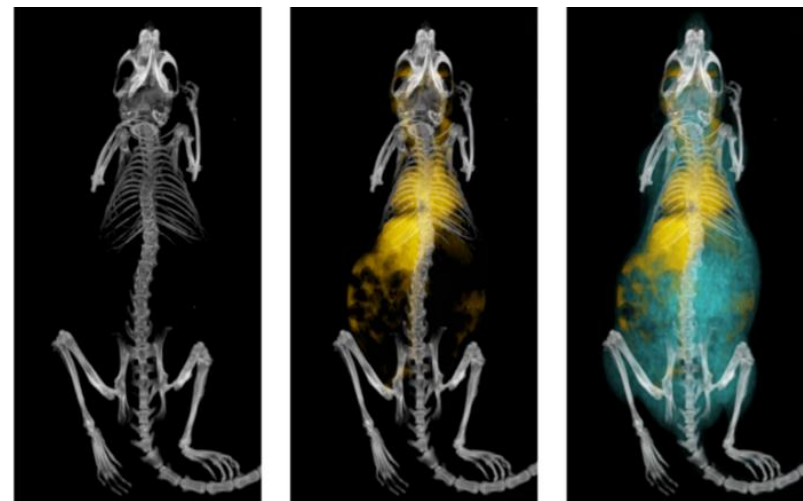
小鼠椎骨感兴趣区高分辨成像



螃蟹



小鼠支气管结构



鼠（白色-骨组织、蓝色-软组织、黄色-钆剂）



项目获得中国体视学学会  
“科技进步一等奖”（2021年2月）

## ■ 系统特点：

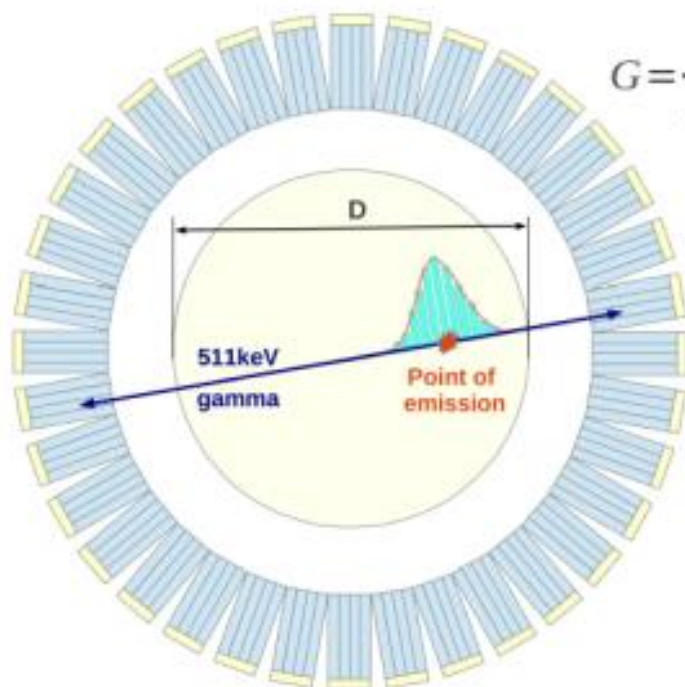
- 基于先进的光子计数能谱CT技术，面向小型活体动物，尤其是小鼠、大鼠等啮齿动物的全身结构实现高信噪比的三维能谱成像；采用先进的重建算法，针对身体局部“感兴趣区”（骨小梁等）实现高分辨率的结构成像。

- 模拟仿真
- 能谱测量技术应用于CT成像
  - 光子计数探测器
  - 大规模电子学技术
  - 高速数据传输技术
- 时间测量技术应用于PET成像
  - 时间测量技术
  - 高速数据传输技术
  - 电子学技术

# 时间测量技术应用于PET成像

## 提升飞行时间（TOF）分辨是PET技术发展的主要方向

- 提升TOF能提高图像信噪比（SNR）
- 提升TOF能提高有效灵敏度
- 提升TOF能降低注射剂量（用于儿科、治疗监测）或扫描时间（更好的临床流程、病人舒适度和低成本）



$$G = \frac{SNR_{TOF}}{SNR_{nonTOF}} = \sqrt{\frac{2 * D}{c * CTR}}$$

For whole body PET  
( $D=40\text{cm}$ ):

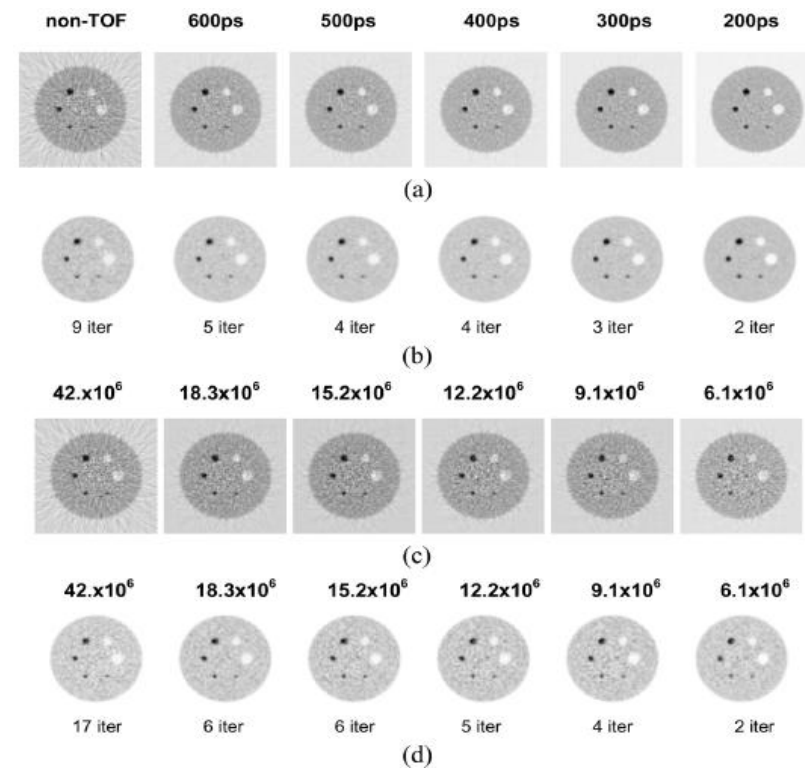
CTR=1ns  $\rightarrow$   $G=1.6$

CTR=500ps  $\rightarrow$   $G=2.3$

CTR=100ps  $\rightarrow$   $G=5.2$

100ps FWHM CTR  
corresponds to  
1.5cm position  
resolution.

M. Conti, Physica Medica (2009) 25, 1-11



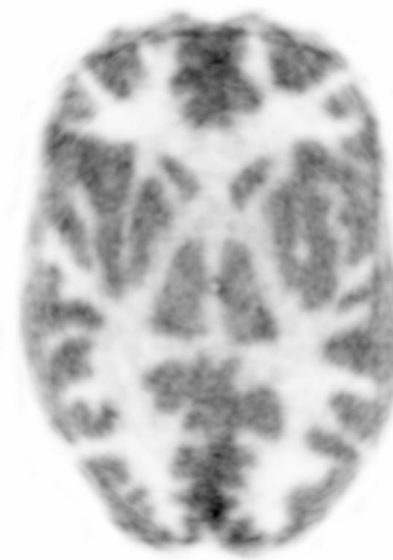
## ■ TOF-PET发展需求



核医学：正电子发射断层成像



Non-TOF



500ps



100ps

飞行时间分辨



“图像清晰度”



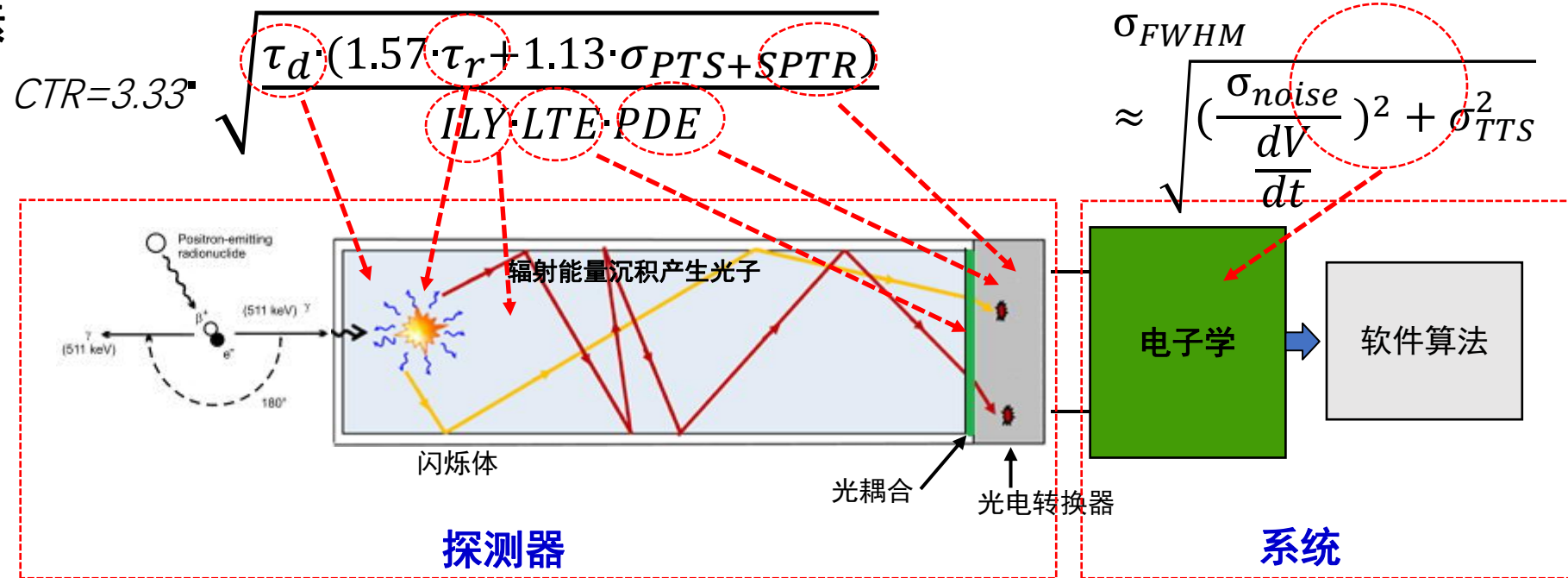
“实时定位成像”

**提高系统有效灵敏度，降低病人注射剂量和扫描时间的同时显著提高图像质量**

**甚至可用于儿科、孕妇诊断**

# 时间测量技术应用于PET成像

## ■ 决定时间分辨的因素



## ■ 决定时间分辨的因素来自于探测系统的各个环节，包括探测器、电子学、算法等

### 闪烁材料（发光体）：

- 发光产额
- 发光速度
- 光传输效率……

### 光电探测器：

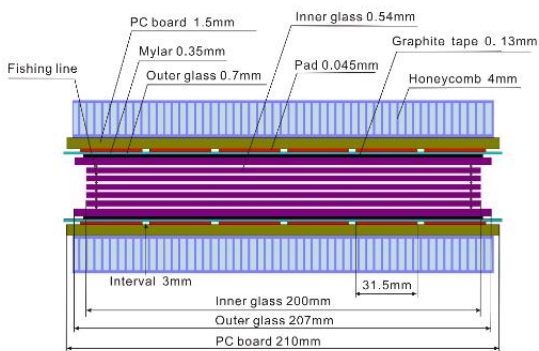
- 光探测效率
- 单光子时间分辨
- 时间分散……

### 电子学与系统：

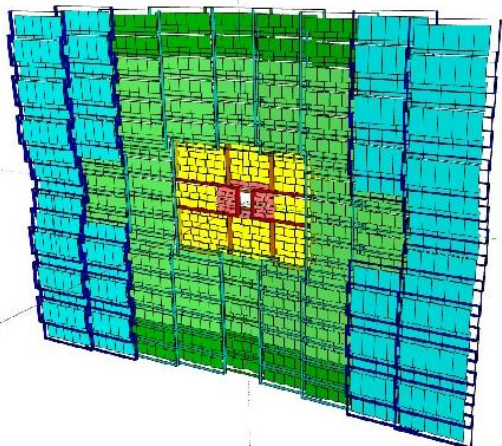
- 时间甄别性能
- 成像算法
- ……

# 时间测量技术应用于PET成像

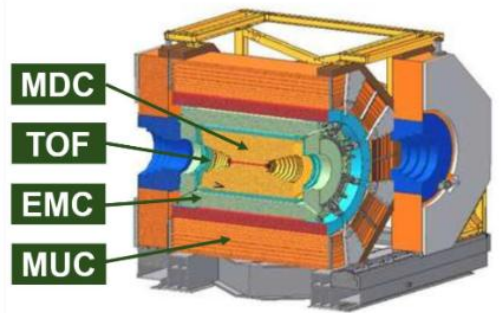
高能物理中时间测量的目的和特点：实现粒子鉴别和提供快速触发判选信号，加速器能量高、时间分辨要求高



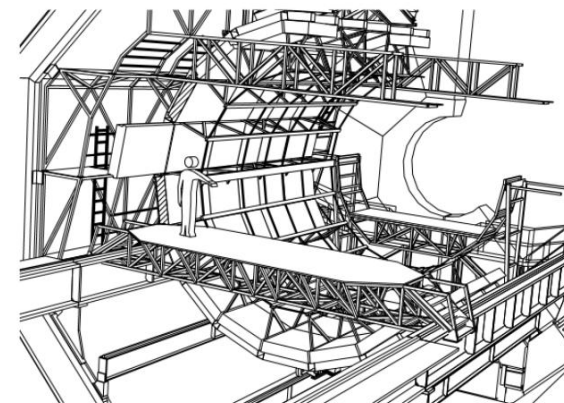
RHIC-STAR TOF (MRPC)  $\sim 70\text{ps}$   
3GeV/c p, K /  $\pi$  粒子



FAIR-CBM TOF (MRPC)  $\sim 80\text{ps}$   
更高计数率30kHz/cm<sup>2</sup>



BESIII-endcap (MRPC)  $\sim 60\text{ps}$



LHC-ALICE TOF system (MRPC) Run2  $\sim 56\text{ps}$   
3GeV/c K/ $\pi$ , 5GeV/c p/K

■ 目标：计数率更高，鉴别更高动量粒子，时间分辨更好 ( $< 20\text{ps}$ )

王贻芳等. 北京谱仪的设计与研制. 上海:上海科学技术出版社, 2011.

Deppner I, Herrmann N. The CBM Time-of-Flight system. Journal of Instrumentation, 2019.

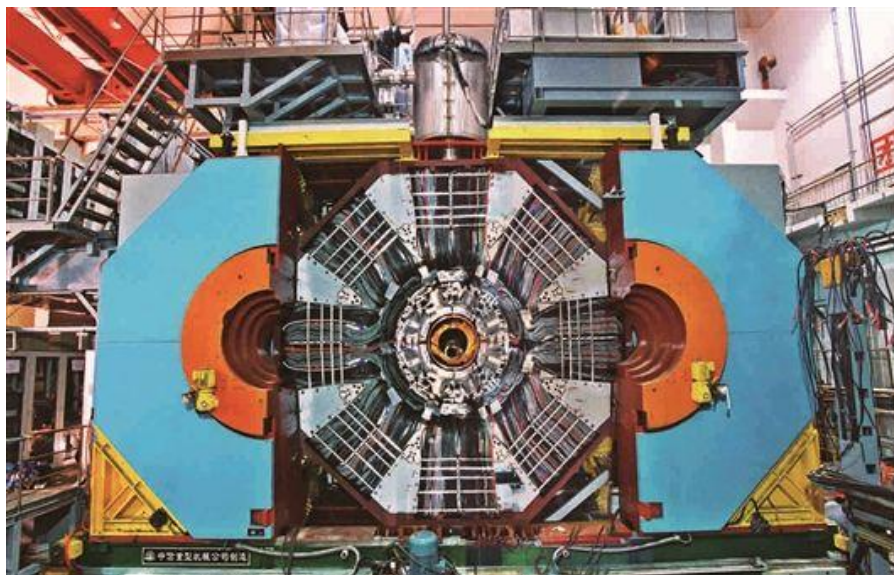
ALICE Time-Of-Flight system (TOF): Technical Design Report

Wang Y, Zhang Q, Han D, et al. Status of technology of MRPC time of flight system. Journal of Instrumentation, 2019.



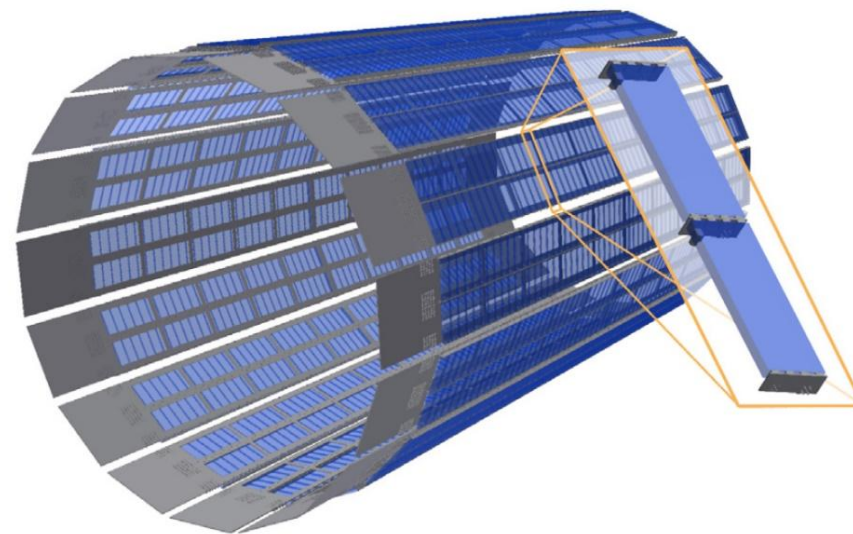
# 时间测量技术应用于PET成像

- 高能物理：飞行时间探测是粒子鉴别与测量的重要手段，提高时间测量精度是BES、BELLE、ATLAS、CMS等大科学装置的重要技术发展方向



北京谱仪升级

BESI: 330ps  
BES II: 180ps  
BES III: 70ps



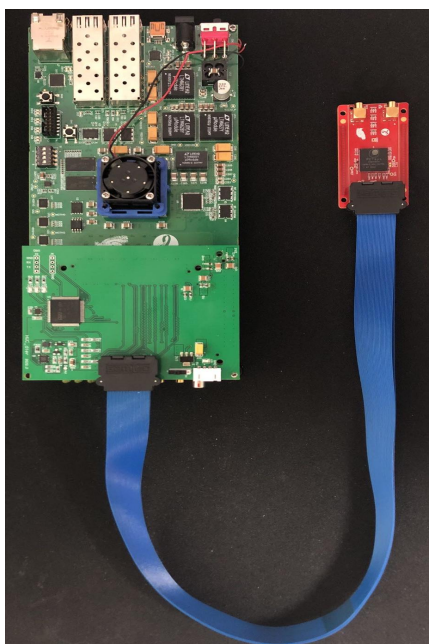
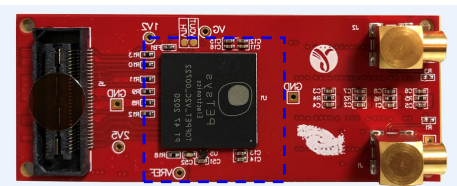
PANDA Barrel-Time-of-Flight detector: 75ps  
(欧洲反质子与离子研究装置)

飞行时间分辨



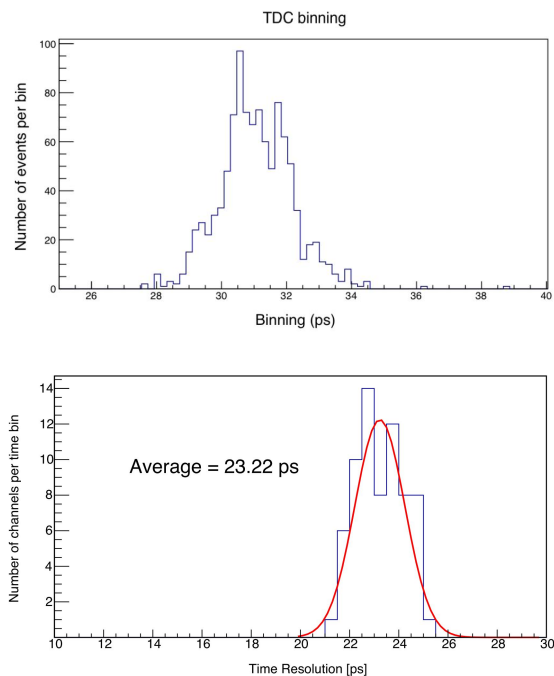
粒子鉴别精度

## ■ 基于商用ASIC的TOF-PET电子学

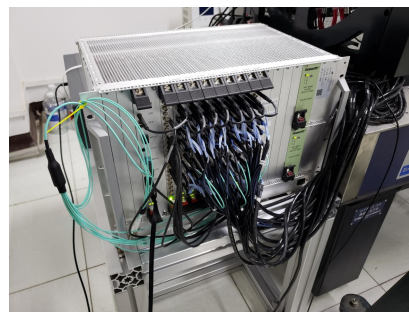
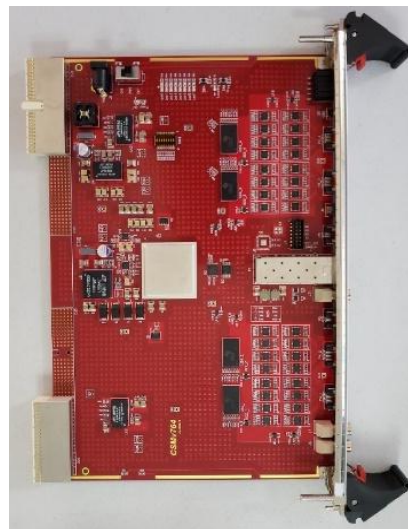


高集成度PET电子学

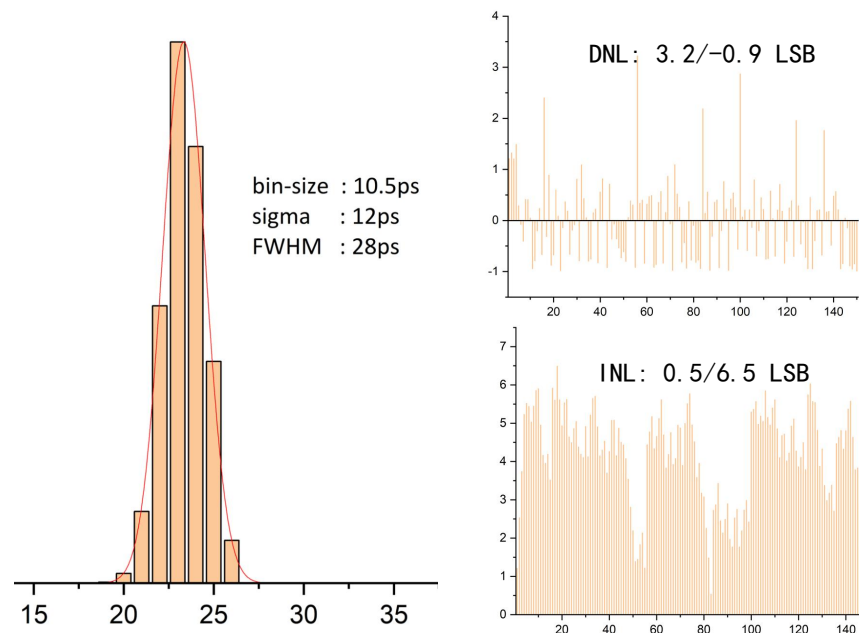
- 64通道ADC、TDC
- Bin size:  $\sim 31$  ps
- 时间分辨:  $\sim 23$  ps (r. m. s)



## ■ 基于FPGA-TDC的高精度TOF-PET电子学

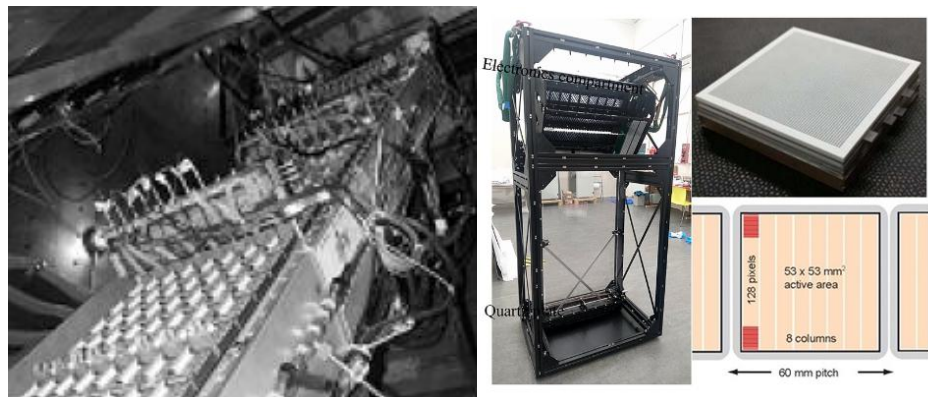


高精度分立PET电子学



- 64通道波形采样, 16通道TDC
- Bin size :  $\sim 10$  ps
- 时间分辨:  $\sim 12$  ps (r. m. s)

## ■ 高能物理对TOF-PET新探测机制启发



### 粒子鉴别和径迹重建 ( $\pi/K/p$ )

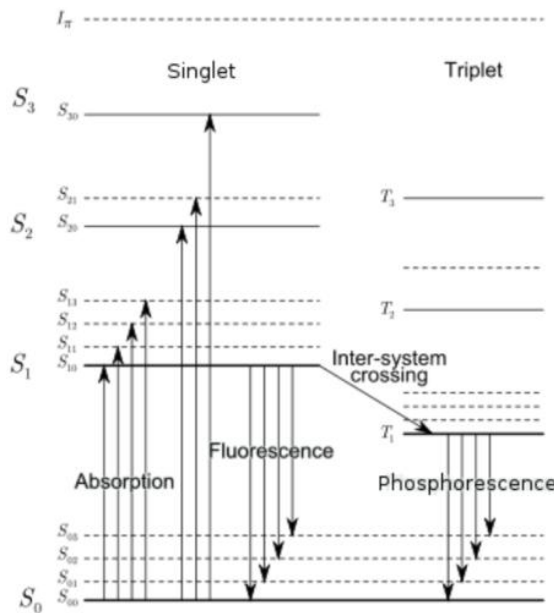
■ 环相切伦科夫计数器 (RICH)

■ 传播时间切伦科探测器 (TOP)

■ 探测全反射切伦科夫探测器 (DIRC)

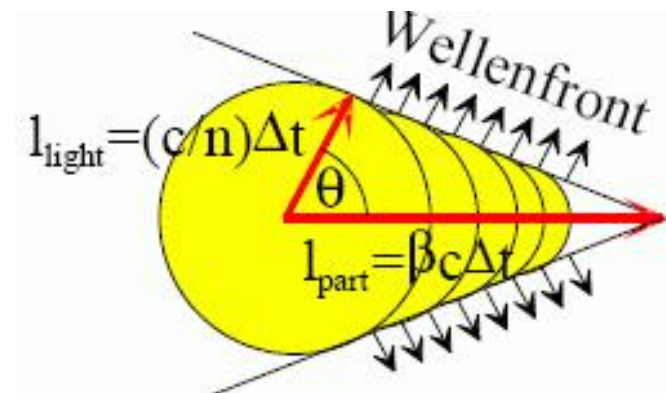
■ 飞行时间切伦科探测器 (TORCH)

## 闪烁光



- 机理：射线激发闪烁体，原子退激发产生荧光
- 发光时间：具有不可避免的发光弛豫时间，发光衰减时间ns或亚ns量级

## 瞬发光子（切伦科夫光）



- 机理：高速带电粒子使介质原子/分子瞬时极化辐射出光子
- 发光时间：不存在发光延迟，光脉冲持续时间短，百ps或亚百ps量级

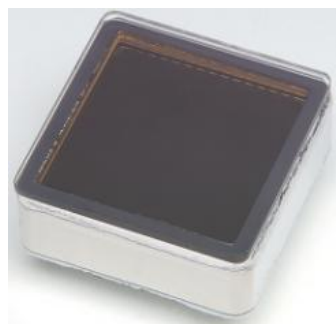
# 时间测量技术应用于PET成像

## ■ 主流超快光电器件及结果

厂商	Hamamatsu		Photonis	
型号	R3809U	R10754	Hi-QE	XP85112
阳极个数	single	4*4	single	8*8
增益	$3 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$1.5 \times 10^5$	$1 \times 10^6$
量子效率@400nm	25%	24%	30%	>20%
暗计数#/cm <sup>2</sup>	2kcps	1kcps	30cps	\
上升时间	160ps	180ps	500ps	500ps
TTS( $\sigma$ )	\	\	40ps	35ps
TTS(FWHM)	<b><math>\leq 25ps</math></b>	\	\	\



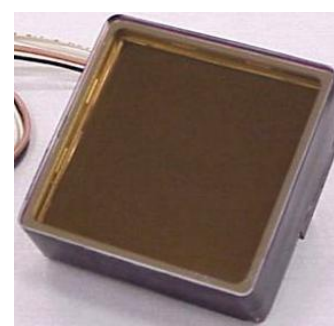
Hamamatsu R3809U  
Single anode



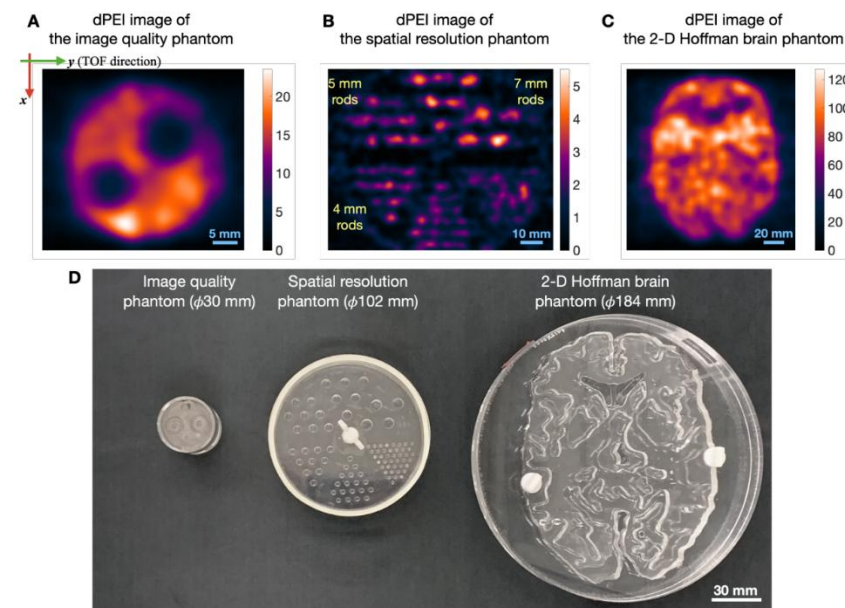
Hamamatsu R10754  
4\*4 anode



Photonis Hi-QE Blue  
Single anode



Photonis XP85112  
8\*8 anode

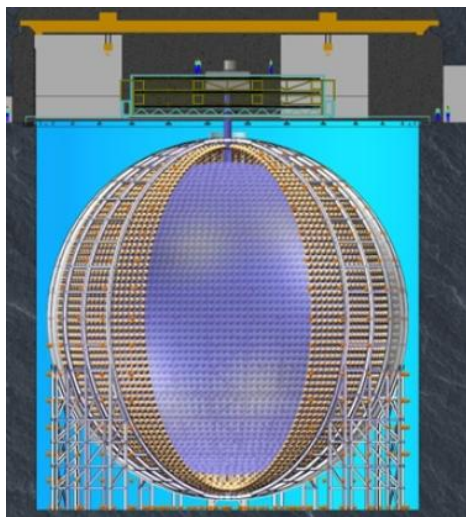


滨松及UCD团队基于切伦科夫辐射的单阳极MCP-PMT探测器，实现了 26.4ps FWHM，并通过准直实现直接PET成像

*Ota, Ryosuke et al. "Direct Positron Emission Imaging: Ultra-Fast Timing Enables Reconstruction-Free Imaging." arXiv:2105.05805*

## ■ 高能物理研究所针对MCP器件研究成立合作组

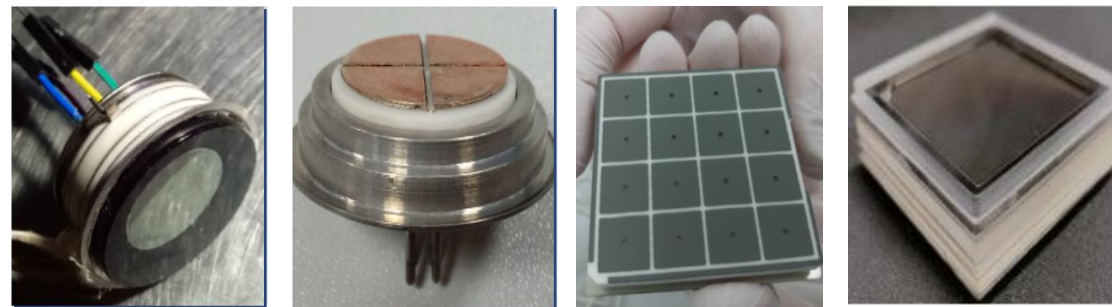
- 研制江门中微子实验的20英寸 MCP-PMT
- 量产超过18000只



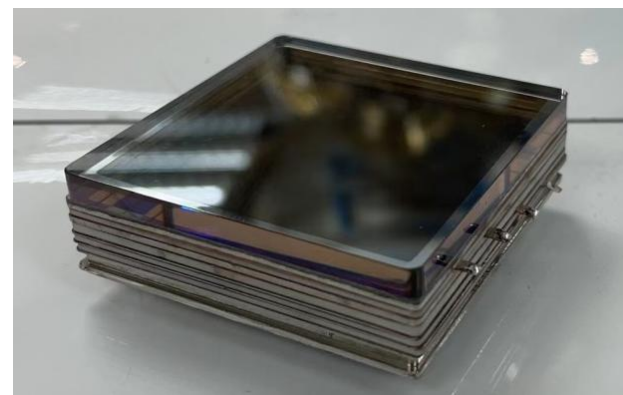
江门中微子实验中18000只  
MCP-PMT的布置



20英寸MCP-PMT样管



已研制出的MCP样管：单阳极—4阳极—16阳极—64阳极

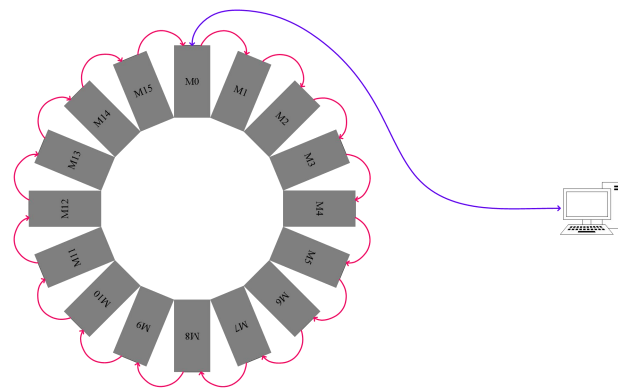
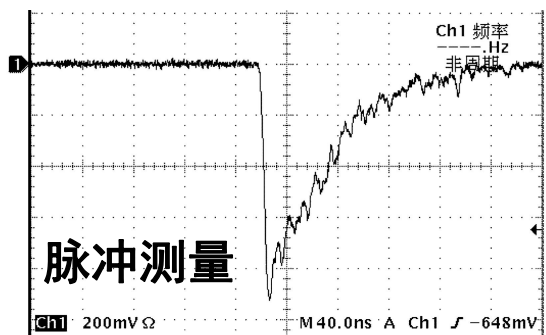


集成窗多阳极MCP-PMT

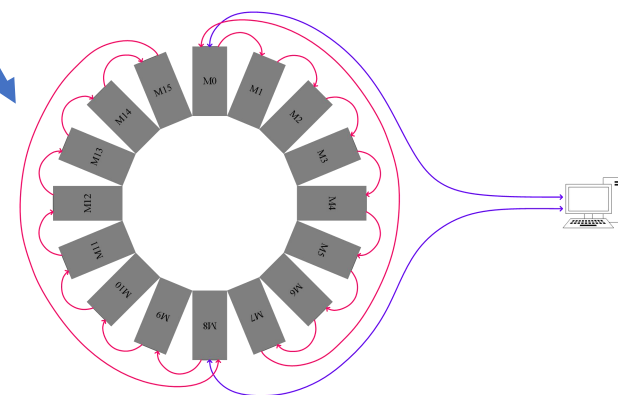
## ■ 时间测量 → 小尺寸单&多阳极超快MCP-PMT研制及应用

## 数据传输

■ 高速光纤数据传输技术，能量、时间、位置及控制信息及Listmode传输，满足不同PET系统的需求



小数据量PET系统：10 Gbps



大数据量PET系统：200 Gbps

单事例信息	传输量(bit)
时间起点	28
粗时间	20
精细时间	8
X	9
Y	9
Z	6
脉冲能量	10
探测器编号	6

- 模拟仿真
- 能谱测量技术应用于CT成像
  - 光子计数探测器
  - 大规模电子学技术
  - 高速数据传输技术
- 时间测量技术应用于PET成像
  - 时间测量技术
  - 高速数据传输技术
  - 电子学技术



2022 大灣區科學論壇

GREATER BAY AREA SCIENCE FORUM

谢谢 Thanks!

致谢 (Acknowledgement):

文中引用图表, 表明来源及来自网络资源的, 在此一并表示感谢!

本人声明承认并尊重原作者版权, 并承诺不用于任何商业目的。



## ■ 备片